

## ЕВОЛЮЦІЯ УДОСКОНАЛЕННЯ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

*Пояснюється принцип дії машин постійного струму з неявнополюсним статором і несиметричною компенсаційною обмоткою, обґрунтовуються переваги цієї машини по енергетичним показникам та питомій витраті мідного проводу порівняно з усіма іншими типами електричних машин. Підкреслюються переваги двигунів постійного струму на транспортних машинах.*

*Объясняется принцип действия машин постоянного тока с неявнополюсным статором и несимметричной компенсационной обмоткой, обосновываются преимущества этой машины по энергетическим показателям и удельным затратам медного провода по сравнению со всеми другими типами электрических машин. Подчеркиваются преимущества двигателей постоянного тока на транспортных машинах.*

125 років тому, в 1885р., машина постійного струму (МПС) набула всі основні риси сучасної конструкції. Були запропоновані і здійснені: барабанний якір з петлевою та хвильовою обмотками, якорі і полюси із листової сталі, додаткові полюси та компенсаційна обмотка в полюсових наконечниках.

Дотепер в Україні (ПАТ "Електромашина", ВАТ "Смілянський електромеханічний завод", ВАТ "Електромаш", м. Херсон) машини постійного струму виготовляють в незмінному вигляді.

Постійною проблемою в МПС була і залишається реакція якора, яка негативно впливає на роботу машини. Реакція якора створює магнітне поле в повітряному зазорі, що спричинює погіршення потенціальної кривої на колекторі, а також діє розмагнічуючим способом на основний магнітний потік. Для зменшення негативного впливу реакції якора збільшують повітряний зазор, а це призводить до необхідності збільшення МРС основних полюсів, тобто до збільшення витрати міді основних полюсів. МРС додаткових полюсів направлена зустрічно МРС якора 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 наконечниках розміщують компенсаційну обмотку, що конструктивно ускладнює машину і здорожує її виготовлення. Велика кількість міді основних і додаткових полюсів обумовлює збільшення втрат електричної енергії та зменшення коефіцієнту корисної дії.

В 70-х роках минулого століття фірма "Сіменс" (Німеччина) впровадила двигуни нових серій 1G3, 1H3 і 1H4 [1], в яких використовують неявнополюсний шихтований магнітопровід статора з виштампованими в них пазами для розміщення рівномірно укладеної у всі пази статора компенсаційної обмотки, а також для розміщення обмоток головних і додаткових полюсів. Компенсаційна обмотка повністю компенсує реакцію якора (рис. 1), але на її виготовлення, так як вона розміщена на більшому діаметрі порівняно з якірною обмоткою, потрібно міді на 10-15 % більше, ніж для якірної обмотки.

Витрата міді на компенсаційну обмотку компенсується зменшенням міді додаткових полюсів (на порядок) і деяким зменшенням міді головних полюсів завдяки зменшенню повітряного зазору між статором

і якором. В результаті економія міді відсутня, але зменшується матеріалоемність на 15-20 %. Така конструкція, як вказується в рекламних проспектах, дозволяє живлення від трифазної мостової схеми при відсутності згладжувальних дроселів і забезпечує можливість роботи при підвищених частотах обертання з великими швидкостями зміни струму.

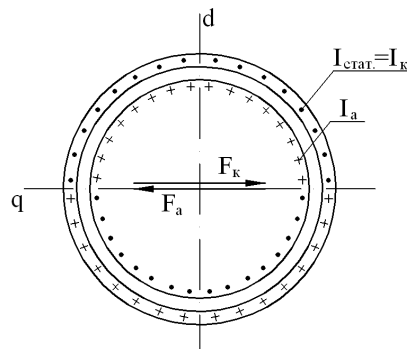


Рис. 1 Симетрична компенсація МРС якора

В деяких машинах серії 4П статори теж виконують по типу статорів асинхронних двигунів. Таке виконання статорів, як вказується в [2], дозволяє при його виготовленні застосувати добре відпрацьовану технологію виробництва статорів асинхронних двигунів, що зменшує трудомісткість виготовлення в 2,5 рази.

Найбільш радикальним і ефективним удосконаленням МПС послідовного і змішаного збудження варто вважати запропоноване в 80-х роках минулого століття несиметричне розміщення компенсаційної обмотки на половиних полюсних ділянках між полюсними і поперечною віссю [3-5]. Компенсаційну обмотку вмикають послідовно з якірною обмоткою; напрям струму в компенсаційній обмотці протилежний напрямку струму в поряд розміщених пазах якірної обмотки (рис. 2).

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

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

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

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

$$F'_{k1} = \frac{2}{\pi} I_a \quad (3)$$

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)

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

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

$$F'_{a1} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{I_a}{2a}. \quad (5)$$

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)

$$F_{a1} = \frac{2}{\pi} \frac{I_a}{2a} \frac{N_a}{2p} K_{об.а} = \frac{4}{\pi} F_{am} k_{об.а} = \frac{8}{\pi^2} F_{am}, \quad (6)$$

де обмотковий коефіцієнт для якорної обмотки

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

Як видно із порівняння формул (4) та (6), 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. 2).

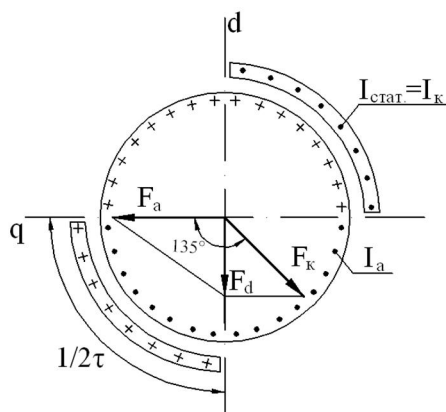


Рис. 2. Несиметрична компенсація МРС якоря

При складанні цих векторів одержуємо вектор результуючої МРС  $F_d$ , який направлений по поздовжній осі. Розподілення МРС обмоток в повітряному зазорі вздовж кола якоря показано на рис. 3. В резуль-

таті спільної дії МРС обмотки якоря і компенсаційної обмотки створюється рівномірно розподілений вздовж кола якоря основний магнітний потік, направлений по поздовжній осі  $d$  (рис. 3).

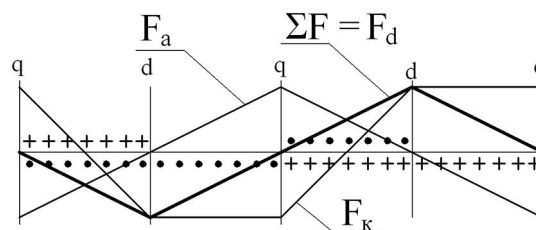


Рис. 3. МРС якорної і компенсаційної обмоток та результуюча МРС при несиметричній компенсації

Рівномірність основного магнітного потоку виключає можливість появи кругового вогню по колектору.

Ефективність розглядуваної несиметричної системи електромагнітного збудження обумовлюється декількома факторами. Обмотковий коефіцієнт компенсаційної обмотки, що розміщується на половині полюсного ділення, в  $\sqrt{2}$  раз більший обмоткового коефіцієнта якорної обмотки і компенсаційної обмотки, яка розміщується на всьому полюсному діленні. МРС несиметричної компенсаційної обмотки повністю компенсує МРС якорної обмотки, а несиметричне розміщення компенсаційної обмотки змушує магнітний потік реакції якоря брати участь у створенні основного магнітного потоку. Порівняно з неявнополюсними машинами фірми "Сіменс" і неявнополюсними машинами серії 4П повністю відпадає необхідність в обмотці послідовного збудження. Порівняно з явнополюсними конструкціями необхідність в МРС додаткових полюсів на порядок зменшується.

Так як магнітний потік рівномірний, нема потреби збільшувати повітряний зазор, як в явнополюсних машинах. Значно менший повітряний зазор в МРС з неявнополюсним статором сприяє збільшенню основного магнітного потоку. Електромагнітний момент пропорційний магнітному потоку і струму якоря, за рахунок магнітного потоку можливо зменшити струм якоря і втрати в обмотці якоря, збільшуючи при цьому ККД. Основний магнітний потік збільшується за рахунок двох факторів: в неявнополюсних машинах в незмінних габаритах можливо збільшити діаметр якоря приблизно на 15 %, при цьому збільшується пропорційно ширина зубців якоря, яку ще більше можливо збільшити за рахунок зменшення ширини зубців якоря, і в результаті індукція в повітряному зазорі зростає до 1,25Тл [6, 7]. Завдяки неявнополюсній конструкції статора спрощується його виготовлення, так як стають непотрібними  $2p$  основні полюси з котушками збудження і  $2p$  додаткові полюси з обмотками.

А головне, зменшується витрата мідного проводу в статорі, в нереверсивних машинах – в 3 рази, в машинах з короточасним реверсним режимом роботи, як, наприклад, в тролейбусних двигунах і двигунах для електромобілів – в 2,5 рази. Зменшується витрата і в якорі, майже в 2 рази. Збільшується коефіцієнт корисної дії – на 3%, так як зменшується кількість міді і втрати в міді [6, 7].

В машинах із швидкозмінним режимом роботи, наприклад, в мотор-колесах самоскидів, відпадає необхідність в компенсаційній обмотці в полюсових наконечниках, яка дуже ускладнює виготовлення таких машин.

В машинах з повноцінним реверсним режимом, як, наприклад, в двигунах для метрополітену, трамваїв, електровозів, двигунів прокатних станів, потрібні дві рівноцінні статорні обмотки, економія міді в статорі складає 20 %, але збільшення коефіцієнту корисної дії залишається незмінним – 3 %, так як в кожному режимі працює тільки одна обмотка.

Проведемо порівняльний аналіз трьох різнотипних двигунів приблизно однакової потужності і швидкості обертання по енергетичним показникам та витраті міді.

В тролейбусному двигуні ЕД139АУ2 серійного виконання потужністю  $P_2 = 140$  кВт,  $n = 1650$  об/хв. коефіцієнт корисної дії  $\eta = 91$  %, витрата мідного проводу розподіляється так: вага міді якоря  $G_{м.я.} = 28,5$  кг, вага міді послідовного збудження  $G_{м.посл.} = 33$  кг, вага міді незалежного збудження  $G_{м.нез.} = 4$  кг, вага міді додаткових полюсів  $G_{м.дол.} = 35$  кг, вага колекторної міді  $G_{м.кол.} = 22$  кг. Сумарна вага міді  $G_{м.} = 122,5$  кг, в статорі –  $G_{м.стат.} = 72$  кг.

В тролейбусному двигуні з неявнополюсним статором і несиметричною компенсаційною обмоткою потужністю  $P_2 = 140$  кВт,  $n = 1700$  об/хв. коефіцієнт корисної дії  $\eta = 93,77$  %, вага міді якоря  $G_{м.я.} = 14$  кг, вага міді компенсаційної обмотки  $G_{м.к.} = 13$  кг, вага міді незалежного збудження  $G_{м.зб.} = 10$  кг, вага міді компенсаційної обмотки для реверсу  $G_{м.рев.} = 5$  кг, вага колекторної міді  $G_{м.кол.} = 22$  кг. Сумарна вага міді  $G_{м.} = 64$  кг, в статорі –  $G_{м.стат.} = 28$  кг.

В асинхронному двигуні (АД) з короткозамкненим ротором 4А280М4У3 потужністю  $P_2 = 132$  кВт,  $n = 1470$  об/хв.,  $\eta = 93$  %,  $\cos\phi_1 = 0,9$ , витрата міді в статорі  $G_{м.1.} = 81$  кг, витрата алюмінію  $G_{ал.2.} = 15$  кг.

В двигуні з фазним ротором 4АНК280С4У3 потужністю  $P_2 = 132$  кВт,  $\eta = 92$  %,  $\cos\phi_1 = 0,88$ , витрата міді в статорі  $G_{м.1.} = 62,5$  кг, в роторі – 40,3 кг, сумарна вага міді  $G_{м.} = 102,8$  кг.

Як бачимо, асинхронні двигуни мають переваги перед двигунами постійного струму серійного виконання і по ККД, і по витраті міді. Але двигун постійного струму з неявнополюсним статором і несиметричною компенсаційною обмоткою перевершує асинхронні двигуни і по ККД, і по витраті міді (відповідно на 26 % і 60 %).

Система електромагнітного перетворення електричної енергії в механічну і навпаки найбільш досконала в машинах постійного струму з неявнополюсним статором та несиметричною компенсаційною обмоткою.

Доцільність застосування енергозберігаючих двигунів повинна оцінюватись з урахуванням додаткових витрат, оскільки підвищення номінальних ККД і  $\cos\phi_1$  в асинхронних двигунах до 5 % досягається за рахунок збільшення маси заліза на 30-35 %, міді на 20-25 %, алюмінію на 10-15 % і в цілому двигуна на 25-30 % відносно звичайних двигунів [8].

Останнім часом із регульованого електроприводу машини постійного струму інтенсивно витісняються

асинхронними двигунами, керованими частотними регуляторами напруги. Але частотне регулювання має свої досить значні недоліки, які потрібно знати.

При живленні асинхронного двигуна від перетворювача з несинусоїдною формою напруги виникають додаткові втрати. Втрати в сталі при  $f = 50$  Гц підвищуються на 30 %, струм холостого ходу – на 32%, ККД знижується на 1,5 %,  $\cos\phi_1$  на 0,05, номінальний струм збільшується на 8 %, ковзання – на 3 %. В номінальному режимі двигун розвиває потужність на 15 % меншу. При  $f = 10$  Гц момент, що розвиває двигун, складає половину від номінального, а потужність, яку він розвиває, – 10 % від номінальної. ККД складає лише 72 % від ККД при  $f = 50$  Гц [8].

При живленні від автономного інвертора напруги і ступінчатої форми напруги, що підводиться до двигуна, перевищення температур елементів конструкції двигуна збільшуються в порівнянні з режимом живлення синусоїдною напругою на 15-30 %. При живленні від перетворювача частоти і прямокутній формі напруги з широтно-імпульсною модуляцією по синусоїдному закону – на 2-10 % [9].

Статичні напівпровідникові перетворювачі на базі діодів, тиристорів і транзисторів генерують вищі гармонічні струми і напруг на вході і виході перетворювачів. Генерація вищих гармонічних струму і напруги викликає спотворення напруги в мережах живлення і підвищені втрати в каналі передачі електроенергії. Рівень вищих гармонік в кривій напруги мережі нерідко досягає 10-15 %.

Застосування двигунів постійного струму (ДПС) на транспортних машинах (тролейбуси, потяги метрополітенів, приміські електропотяги на залізній дорозі, електромобілі, тепловози, теплоходи) з точки зору експлуатаційних витрат більш вигідне порівняно з асинхронним приводом. При збільшенні швидкості транспортного засобу навантаження на двигун падає, його електромагнітний момент зменшується, зменшується струм якоря в ДПС і електричні втрати зменшуються пропорційно квадрату навантаження [10]. В АД струм статора із-за значної намагнічуючої складової зменшується незначно і втрати в АД зменшуються значно повільніше порівняно з ДПС.

Порівняльні дослідження ДПС ЕДУ-133 і АД ДАТ-305 потужністю обох двигунів  $P_2 = 305$  кВт були проведені на тепловозі потужністю 2200 кВт [10]. Ось деякі висновки: "при вибраному режимі руху сумарні втрати в електродвигуні ДАТ-305 приблизно в 1,5 рази більші, ніж в електродвигуні ЕДУ-133", "ККД асинхронного двигуна в експлуатації завжди буде менший ККД двигуна постійного струму", "при потужності тягового електродвигуна 300 кВт його інтегральний ККД буде на 5 % нижчий ККД тягового електродвигуна постійного струму".

Для краново-металургійного і екскаваторного електроприводу, що характеризується повторнокороткочасним режимом роботи при великій частоті включення, широким діапазоном регулювання частоти обертання та великою кратністю пускових і перевантажувальних обертаючих моментів розроблена і створена спеціальна серія ДПС з незалежним збудженням. ДПС з неявнополюсним статором і несиметричною

компенсаційною обмоткою можуть забезпечити механічні характеристики машин з незалежним збудженням, якщо на статорі розмістити обмотку незалежного збудження з регулятором напруги, що буде забезпечувати зміну струму збудження як по величині, так і по напрямку.

### ВИСНОВКИ

В епоху, коли вартість енергоносіїв невідносно зростає, енергозберігаючі двигуни набувають пріоритетного значення. МПС з неявнополюсним статором і несиметричною компенсаційною обмоткою, як машини з найбільшим ККД порівняно з усіма іншими типами машин і найменшою питомою витратою мідного проводу, повинні потіснити асинхронний електропривід з частотним регулюванням з багатьох уже завойованих ним позицій.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Beier E., Schuler W. Oberflächengekühlte Gleichstrommotoren für Stromrichterspeisung im Drehmomentbereich von 75 bis 450 Nm – "Siemens Zeitschrift", 1974, T-4, S. 257-261.
2. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.:ил.
3. А.с. №849386 СССР, М. кл. N02K 23/02, 1/16. Двигатель постоянного тока / В.Д. Лущик.
4. Лущик В.Д. Двигатели постоянного тока с неявнополюсным статором // Электротехника. – 1992. – № 8-9. С. 14-17.
5. Лущик В.Д. Суміщені електричні машини та апарати. К: Техніка, 1993. – 203 с.
6. Лущик В.Д. Електричні машини постійного струму з новою системою електромагнітного збудження // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 39-41.
7. Лущик В.Д., Варванський А.Ю. Стартер-генератор постійного струму з неявнополюсним статором для тепловозів // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 21-24.
8. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навч. посібник. – К: Кондор, 2005. – 408 с.
9. Петренко А.Н. Экспериментальное исследование нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных источниках питания // Электротехника і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 21-23.
10. Логинова Е.Ю. Лисицын Д.А. Обоснование выбора тягового электропривода локомотива по критериям условной эффективности / Сб. трудов МИИТа // Транспорт: наука, техника, управление. 2004. – № 10. – С. 15-19.

**Bibliography (transliterated):** 1. Beier E., Schuler W. Oberflächengekühlte Gleichstrommotoren für Stromrichterspeisung im Drehmomentbereich von 75 bis 450 Nm - "Siemens Zeitschrift", 1974, T-4, S. 257-261. 2. Tokarev B.F. `Elektricheskie mashiny: Ucheb. posobie dlya vuzov. - M.: `Energoatomizdat, 1990. - 624 s.:il. 3. A.s. №849386 SSSR, M. kl. N02K 23/02, 1/16. Dvigatel' postoyannogo toka / V.D. Lushchik. 4. Lushchik V.D. Dvigateli postoyannogo toka s neyavnopolyusnym statorom // `Elektrotehnika.-1992. - № 8-9. S. 14-17. 5. Lushchik V.D. Sumischeni elektrichni mashini ta aparati. K: Tehnika, 1993. - 203 s. 6. Lushchik V.D. Elektrichni mashini postijnogo strumu z novoyu sistemoyu elektromagnitnogo zbudzhennya // Elektrotehnika і elektromehanika. - 2008. - № 2. - S. 39-41. 7. Lushchik V.D., Varvans'kij A.Yu. Starter-generator postijnogo strumu z neyavnopolyusnim statorom dlya teplovoziv // Elektrotehnika і elektromehanika.-2009.-№ 6.- S. 21-24. 8. Zakladnij O.M., Prahovnik A.V., Solovej O.I. Energozberezhennya zasobami promislovogo elektroprivoda: Navch. posibnik. - K: Kondor, 2005. - 408 s. 9. Petrenko A.N. `Eksperimental'noe issledovanie nagreva chastotno-upravlyаемого asinhronnogo dvigatelya pri razlichnyh istochnikah pitaniya // Elektrotehnika і elektromehanika. - 2010. - № 5. - S. 21-23. 10. Loginova E.Yu. Lisicyн D.A. Obosnovanie vybora tyagovogo `elektroprivoda lokomotiva po kriteriyam uslovnoj `effektivnosti / Sb. trudov MIITa // Transport: nauka, tehnika, upravlenie. 2004. - № 10. - S. 15-19.

Надійшла 28.04.2011

Лущик В'ячеслав Данилович, д.т.н., проф.  
Донбаський державний технічний університет  
кафедра "Електричні машини і апарати"  
94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16  
тел.: (06442) 2-31-23  
e-mail: info@dgmi.edu.ua

Варванський Артем Юрійович, вед. інженер  
ПАТ "Електромашина", СКБ  
61016, Харків, вул. Муранова, 106  
тел. (050) 230-36-49, e-mail: Art\_v\_u@rambler.ru

Lushchik V.D., Varvansky A.Yu.

### Evolution of dc machines improvement and prospect of their further development

Operating principle for DC machines with a non-salient-pole stator and an asymmetrical compensation winding is explained. Advantages of these machines are grounded relative to power indexes and specific consumption of copper wire as compared with all other types of electric machines. Advantages of DC motors application in transport machines are underlined.

**Key words – non-salient-pole stator DC machines, asymmetrical compensation winding, power indexes.**