

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РІЗНИХ ТИПІВ СИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

Ю.М. Васьковський*, докт. техн. наук, **В.В. Павлюк**
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.
E-mail: vun157@gmail.com; 2812vova@gmail.com.

Методами математичного моделювання проведено порівняльний аналіз характеристик електромагнітного моменту та потужності трьох варіантів тягових синхронних двигунів: синхронного реактивного двигуна, гібридного синхронного реактивного двигуна з додатковими постійними магнітами на роторі та синхронного двигуна з встановленими на поверхні ротора постійними магнітами. Порівняльний аналіз проведено за умов однакових габаритів двигунів, номінальних величин струму обмотки статора та швидкості обертання ротора. Встановлено, що за заданих умов найбільшу потужність і момент розвиває синхронний двигун з постійними магнітами на поверхні, але в ньому спостерігаються і найбільші пульсації моменту. Конструктивні заходи щодо зменшення пульсацій моменту одночасно призводять до помітного зменшення номінальної потужності двигунів. Отримані результати можуть бути використані під час вибору доцільного типу синхронного тягового двигуна з урахуванням заданих компромісних вимог до характеристик двигунів і умов експлуатації транспортного засобу. Бібл. 12, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: тяговий синхронний двигун, постійні магніти ротора, електромагнітний момент, пульсації електромагнітного моменту.

Постановка задачі. Розвиток і створення нових сучасних електротранспортних засобів (ЕТЗ) вимагає подальшого підвищення ефективності та надійності тягових електродвигунів (ТЕ), що входять до їхнього складу. Тому науково-технічна проблема удосконалення конструкцій ТЕ та вибору їхніх оптимальних типів для ЕТЗ з урахуванням особливостей їхнього функціонування залишається актуальною.

Серед значної кількості відомих типів ТЕ (постійного струму, асинхронних, синхронних реактивних, синхронних з електромагнітним збудженням або з постійними магнітами на роторі тощо) перспективними для широкого використання в ЕТЗ різного типу та призначення є безконтактні синхронні ТЕ. Це обумовлено їхніми добрими масо-габаритними показниками та достатньо високим рівнем надійності. Але в межах класу синхронних ТЕ існують конструктивні різновиди, які суттєво відрізняються перш за все конструкцією ротора [1]. У роботах різних авторів досліджуються окремі варіанти синхронних ТЕ, багато з них присвячено синтезу оптимальних методів керування ТЕ для покращення їхніх характеристик [2-5]. Але характеристики двигунів, головним чином, визначаються особливостями їхніх конструкцій. Тому актуальним є порівняльний аналіз номінальних енергетичних характеристик синхронних ТЕ різного типу для оцінки їхньої конкурентної спроможності та перспектив використання в ЕТЗ різного призначення [6-8]. У даній роботі виконано порівняльний аналіз трьох варіантів потужного синхронного ТЕ. *Перший* – це синхронний реактивний двигун (СРД) (англійська назва – synchronous reluctance motor (SRM)). Добре відомі його переваги – простота конструкції, висока надійність, невелика вартість – роблять його конкурентоспроможним серед інших можливих варіантів безконтактних синхронних ТЕ. Електромагнітний (реактивний) момент в СРД виникає внаслідок силової взаємодії явнополюсного феромагнітного ротора з магнітним полем обмотки статора. За величиною електромагнітного моменту СРД за інших рівних умов, зазвичай, поступається ТЕ, в яких момент створюється внаслідок силової взаємодії магнітного поля обмотки статора і магнітного поля постійних магнітів (ПМ) ротора. Тому *другий* розглянутий у статті варіант – це СРД з додатково встановленими в роторі ПМ (СРДПМ) (permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMSRM)). Цей варіант являє собою “підсилена” за рахунок ПМ конструкцію СРД [9, 10]. Його мож-

на розглядати як гібридну конструкцію, в якій електромагнітний момент складається з суми реактивного моменту СРД і моменту, утвореного взаємодією магнітних полів ПМ і струмів обмотки статора. Третій варіант – синхронний двигун з зовнішніми постійними магнітами (СДЗПМ) (permanent magnet assisted synchronous motor (PMSM)), які встановлені на поверхні ротора та мають радіальний напрямок вектора намагнічування. Як свідчать результати досліджень, такий двигун у порівнянні з іншими конструктивними варіантами має більш високі техніко-економічні показники [1]. Зазначені варіанти ТЕ відрізняються лише конструкцією ротора, а статори є однаковими і мають розподілену трифазну обмотку, яка живиться синусоїдним струмом. Всі зазначені варіанти ТЕ є безконтактними. Хоча обрані варіанти синхронних ТЕ не вичерпують усі можливі конструктивні варіанти їхнього виконання, але порівняння їх характеристик надає конкретну практичну інформацію щодо доцільності їхнього використання в ЕТЗ.

Порівняльний аналіз проводиться за однакових наступних умов: 1) габарити та геометричні характеристики двигунів, у тому числі зовнішній діаметр статора та внутрішній діаметр ротора, активна довжина, висота повітряного проміжку; 2) схема та конструкція обмотки статора; 3) величина струму обмотки статора в номінальному режимі, що забезпечує однаковий нагрів двигунів; 4) номінальна частота обертання ротора; 5) кут навантаження. Остання умова означає, що внаслідок різних кутівих характеристик кожен з двигунів за одного і того ж кута навантаження буде створювати різний електромагнітний момент і, відповідно, мати різну потужність. Зазначена порівняльна база дає можливість чітко визначити вплив на величину електромагнітного моменту та потужність двигуна особливостей конструкції ротора.

Мета роботи – порівняльний аналіз характеристик електромагнітного моменту і потужності трьох зазначених варіантів ТЕ задля визначення їхньої конкурентної спроможності та можливих сфер застосування в ЕТЗ.

Об'єкт дослідження. Дослідження проведено на прикладі потужного ТЕ, який є перспективним для використання в різних ЕТЗ і має наступні характеристики: фазний номінальний струм 310 А (діюче значення); число пар полюсів ротора 2; номінальна частота обертання ротора 1500 об/хв. Активна потужність двигунів і напруга живлення визначаються за результатами розрахунків. Габаритні та геометричні дані: зовнішній діаметр статора 0,46 м; діаметр розточки статора 0,3 м; активна довжина статора 0,3 м; повітряний проміжок 0,002 м; кількість пазів статора 36; обмотка статора – трифазна двошарова; кількість ефективних провідників у пазу 6; кількість паралельних гілок 1; висота пазу 0,04 м; ширина пазу 0,0145 м. Постійні магніти – NdFeB (залишкова індукція 1 Тл; коерцитивна сила 850 кА/м). Оскільки аналізуються сталі номінальні режими, а пуск і керування швидкості двигунів виконується частотним перетворювачем, то демпферна система ротора не розглядається. На рис. 1 зображено поперечні розрізи активної зони варіантів ТЕ. Явнополюсна конструкція ротора в СРД утворюється шляхом виконання в роторі немагнітних потокових бар'єрів, які зазвичай є повітряними проміжками (рис. 1, а). В СРДПМ в потокові бар'єри додатково вкладаються ПМ (рис. 1, б). В СДЗПМ (рис. 1, в) ПМ укладаються на поверхні ротора та мають радіальний напрямок намагнічування. Об'єм ПМ в СРДПМ і СДЗПМ є однаковим, що забезпечує й однакові величини МРС ротора.

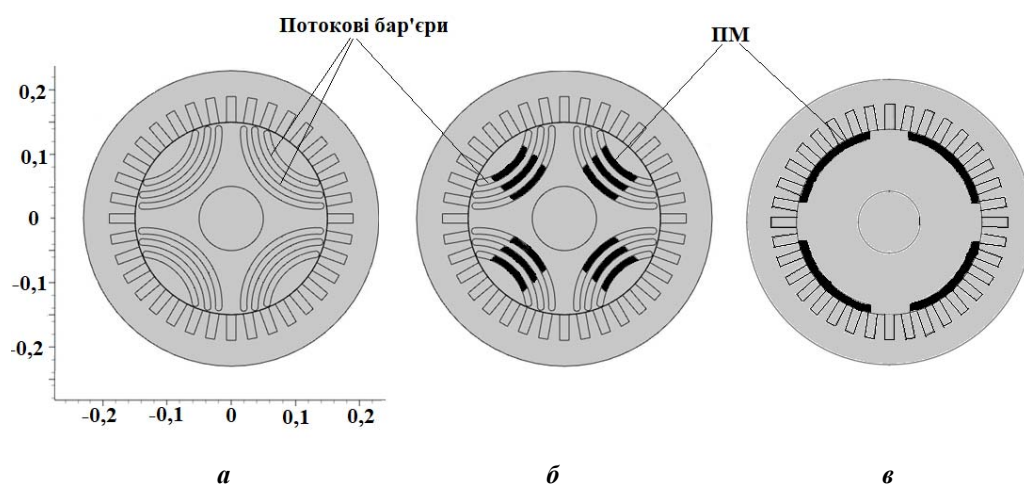


Рис. 1

Математична модель. Кінцевим результатом математичного моделювання є часові залежності електромагнітного моменту. Для аналізу сталого режиму роботи достатньо розрахувати зазначені

часові залежності за один повний оборот ротора [11]. Струми в фазах трифазної обмотки статора є синусоїдними і змінюються згідно наступних формул:

$$I_A = I_m \cos(\omega t + \theta); \quad I_B = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta\right); \quad I_C = I_m \cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \theta\right), \quad (1)$$

де I_m , ω – амплітуда та кутова частота струму відповідно; θ – кут навантаження двигуна. За допомогою кута θ в формулах (1) формується зсув осі магнітного поля, утвореного струмами обмотки статора, по відношенню до осі полюсів ротора, що відображає рівень навантаження синхронного двигуна.

Аналіз поля достатньо виконати в двовимірному наближенні. Враховуючи, що магнітопроводи статора і ротора шихтовані, а ПМ є практично неелектропровідними, приймаємо, що електропровідність усіх середовищ в активній зоні двигунів дорівнює нулю, тобто нехтуємо індукованими вихровими струмами. Тому для двовимірного магнітного поля в декартових координатах отримаємо наступне нелінійне стаціонарне рівняння відносно векторного магнітного потенціалу A_z :

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{z\text{статор}}, \quad (2)$$

де $J_{z\text{статор}}$ – густина струму в пазах статора, яка задається у відповідності до рівнянь (1) з урахуванням наявної площі поперечного перерізу пазів статора. Магнітна проникність μ на ділянках феромагнітних осердь двигуна визначається за допомогою відповідних кривих намагнічування. Для отримання часових залежностей моменту рівняння (2) розв'язується з урахуванням зміни у часі струмів згідно (1) і кутового положення ротора, який обертається з незмінною кутовою швидкістю ω_R .

Таким чином, шляхом чисельного розв'язання задачі шукані часові залежності електромагнітного моменту $M_{EM}(t)$ знаходяться у вигляді сукупності дискретних значень моменту, отриманих під час розв'язання рівняння (2) в моменти часу $t_k = t_{k-1} + \Delta t$, $k = 1, N$ з заданим кроком по часу Δt . При цьому кожному моменту часу відповідає певна кутова координата ротора

$$\gamma_k = \gamma_{k-1} + \omega_R \Delta t$$

і миттєві значення струмів фаз статора

$$I_{Ak} = I_m \cos(\omega t_k + \theta); \quad I_{Bk} = I_m \cos\left(\omega t_k + \frac{2\pi}{3} + \theta\right); \quad I_{Ck} = I_m \cos\left(\omega t_k + \frac{4\pi}{3} + \theta\right).$$

Рівняння (2) разом з однорідними граничними умовами на зовнішній поверхні осердя статора розв'язується методом скінченних елементів в середовищі програми Comsol Multiphysics. Отримана в такий спосіб сукупність значень векторного магнітного потенціалу в моменти часу t_k відображає функціональну залежність векторного потенціалу від часу $A_z(t)$.

Миттєве значення електромагнітного моменту знаходиться за допомогою наступної формули, яка ґрунтується на використанні тензора магнітного натягнення на поверхні ротора

$$M_{EM}(t) = \frac{2pR_\delta l_\Pi}{\mu_0} \int_0^\tau B_n B_\tau dl, \quad (3)$$

де p , τ – число пар полюсів і полюсна поділлка відповідно; l_Π , R_δ – активна довжина та радіус ротора.

Вектор магнітної індукції \vec{B} в будь-якій точці поверхні ротора можна представити у вигляді суми нормальної B_n (направленої уздовж вектора нормалі до точки поверхні) і тангенціальної B_τ (направленої уздовж дотичного вектора) проєкцій. Момент також можна розрахувати через миттєві значення тангенціальної складової тензора магнітного натягнення T_τ або його проєкцій T_x , T_y в декартовій системі координат

$$M_{EM}(t) = 2pl_\Pi R_\delta \int_0^\tau T_\tau dl = 2pl_\Pi \int_0^\tau (yT_x - xT_y) dl, \quad (4)$$

де $T_\tau = B_n B_\tau / \mu$; μ – магнітна проникність.

Середнє значення електромагнітного моменту знаходиться інтегруванням миттєвого значення моменту в межах періоду часу T повного обороту ротора

$$M_{EM\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^\tau M_{EM}(t) dt. \quad (5)$$

Миттєве магнітне потокозчеплення фази, що складається з q послідовно з'єднаних котушок, кожна з яких має w_k витків, знаходиться інтегруванням векторного магнітного потенціалу по сумарній площі $S_{\Sigma q}$ поперечного перерізу сторін усіх котушок фази, що мають струми одного напрямку

$$\Psi_{\Phi}(t) = \frac{2w_k l_{\Pi}}{S_{1q}} \int_{S_{\Sigma q}} A_z(t) ds, \quad (6)$$

де S_{1q} – площа перерізу однієї котушки. Знайдене за формулою (6) потокозчеплення фази обмотки враховує сумарне потокозчеплення від усіх магнітних потоків, які в класичній теорії електричних машин прийнято розглядати окремо (потоки взаємодукції, пазового та диференційного розсіювання, вищих гармонік). Не враховуються лише потоки лобового розсіювання. Але в синхронних машинах з ПМ ротора вплив лобового розсіювання незначний, а вразі необхідності його можна врахувати окремим доданком. Миттєве значення ЕРС в фазі статора знаходиться згідно формули

$$e_{\Phi}(t) = -\frac{d\Psi_{\Phi}(t)}{dt} = -\frac{2w_k l_{\Pi}}{S_{1q}} \int_{S_{\Sigma q}} \frac{\partial A_z(t)}{\partial t} ds. \quad (7)$$

Напруженість електричного поля $E_z(t)$ за умови відсутності незмінних електричних зарядів в активній зоні електричної машини визначається формулою $E_z(t) = -\frac{\partial A_z(t)}{\partial t}$. Тому ЕРС можна знайти як

$$e_{\Phi}(t) = \frac{2w_k l_{\Pi}}{S_{1q}} \int_{S_{\Sigma q}} E_z(t) ds. \quad (8)$$

Якщо нехтувати падінням напруги на активному опорі обмотки статора, то прикладена до обмотки статора напруга мережі живлення урівноважується внутрішньою ЕРС двигуна $u_{\Phi}(t) = -e_{\Phi}(t)$.

Коефіцієнт потужності двигуна можна знайти в наступний спосіб. Маючи дві відомі періодичні функції часу – струму за формулою (1) і напруги за формулою (8) та відобразивши їхні графіки разом на осі часу, можна знайти кут фазового зсуву φ між ними і, відповідно, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$.

Діюче (середнє) значення активної потужності двигуна знаходиться після розрахунку середнього значення електромагнітного моменту за формулою (5)

$$P = M_{EMcp} \omega_R. \quad (9)$$

З іншого боку активна потужність, яку споживає двигун з мережі

$$P = \sqrt{3}/2 I_m U_{\Pi} \cos\varphi. \quad (10)$$

З формул (9), (10) можна знайти діюче значення лінійної напруги живлення, яка потрібна для протікання заданих струмів в фазах обмотки статора двигуна

$$U_{\Pi} = \sqrt{2/3} M_{EMcp} \omega_R / (I_m \cos\varphi). \quad (11)$$

Для оцінки пульсацій моменту використовується коефіцієнт пульсацій, який відображає відношення різниці максимального M_{EMmax} і мінімального M_{EMmin} моментів до їхнього середнього значення

$$K_{\Pi} = \frac{M_{EMmax} - M_{EMmin}}{2M_{EMcp}}. \quad (12)$$

Розроблена комплексна математична модель (1) – (12) дає змогу визначити та проаналізувати усю сукупність номінальних енергетичних характеристик зазначених типів двигунів.

Пульсації електромагнітного моменту. Значні пульсації електромагнітного моменту в синхронних двигунах даного типу є головним їхнім недоліком. Тому потрібне чітке обґрунтування конструктивних рішень, направлених на зменшення пульсацій моменту, та визначення впливу кожного із них. Ця проблема розглядалася в роботах різних авторів, наприклад [9, 12].

Проаналізуємо причини виникнення пульсацій моменту на прикладі СДЗПМ.

На рис. 2 показано зміну картини поля СДЗПМ через зміну навантаження машини. На рис. 2, *a* наведено картину поля в режимі умовного холостого ходу (за відсутності струмів в обмотці статора); на рис. 2, *б* – картину поля в режимі роботи зі струмами статора, які дорівнюють половині номінального струму; на рис. 2, *в* – картину поля за номінальних струмів в обмотці статора.

Очевидні суттєві відмінності розподілу магнітного поля в зазначених режимах роботи двигуна. За холостого ходу вісь симетрії поля *a* співпадає з поздовжньою віссю *d* полюсу ротора, і магніт-

ний потік замикається від ПМ однієї полярності до ПМ іншої полярності через ярмо статора та значні за величиною немагнітні проміжки, які дорівнюють товщині ПМ. Під час навантаження машини завдяки реакції струмів обмотки статора результуючий магнітний потік поступово зміщується в зону феромагнітних проміжків між ПМ (до поперечної осі q). Причому основна частина потоку кожного полюсу тепер замикається в межах одного ПМ через відносно невеликі повітряні проміжки між статором і ротором. Між віссю d і віссю симетрії результуючого поля α утворюється кут навантаження θ .

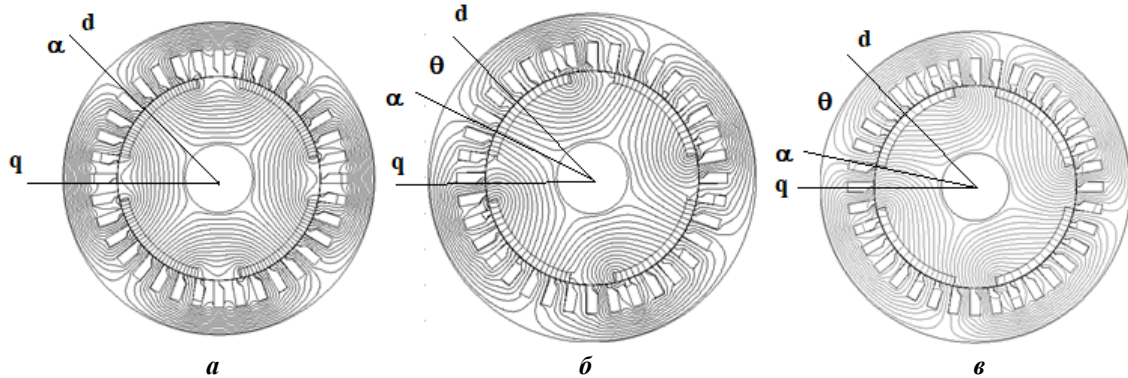


Рис. 2

Під час обертання ротора завдяки зубцево-пазовій структурі осердя статора періодично змінюється магнітний опір на шляху магнітного потоку, що викликає пульсації потоку i , як наслідок, пульсації електромагнітного моменту. У даному варіанті конструкції ротора СДЗПМ над феромагнітними проміжками між ПМ через обертання ротора періодично чергуються 2 і 3 зубця статора. При цьому магнітний опір зубцево-пазової зони статора змінюється приблизно в 1,5 рази. Тобто наявність зубцево-пазової структури статора є одною з головних причин вібрацій моменту двигуна. Іншою причиною є дискретність розташування котушок обмотки статора по пазах. Результати моделювання показали, що в ідеальному випадку безпазової конструкції статора, коли на гладкій внутрішній поверхні статора укладається неперервна ідеальна (синусна) обмотка, пульсації потоку та моменту зникають. Таким чином пульсації моменту виникають внаслідок обертання ротора відносно неоднорідної структури статора. Аналогічними є і причини пульсацій моменту в СРД і СРДПМ.

В ряді опублікованих робіт запропоновано заходи щодо зменшення пульсацій моменту в двигунах даного типу. Більшість цих заходів запозичено з теорії синхронних електричних машин. Зниження пульсацій можна досягти зменшенням неоднорідності зубцево-пазової зони статора та оптимізацією конструкції ротора. Серед таких заходів відмітимо: а) зменшення відкриття пазів статора – чим менше відкриття пазів, тим більш “гладкою” є внутрішня поверхня осердя статора. З урахуванням існуючої технології укладанням провідників в пази статора для машин середньої потужності пази доцільно виконувати напівзакритими; б) виконання обмотки статора двошаровою з вкороченим кроком; в) збільшення висоти повітряного проміжку. Але вибір висоти проміжку потрібно узгоджувати з вимогами щодо необхідної величини магнітного потоку взаємодуції, потужності двигуна та іншими чинниками.

У разі оптимізації конструкції ротора зниження пульсацій потоку можливо за рахунок зменшення ширини ПМ і відповідного збільшення ширини феромагнітних проміжків між ПМ. Наприклад, якщо кількість зубців статора над феромагнітними проміжками чергується в межах 4 і 5 зубців, то магнітний опір зубцево-пазової зони статора змінюється в 1,25 рази. Але зменшення ширини ПМ, навіть за пропорційного збільшення їхньої товщини (тобто без зміни об’єму ПМ), призводить до зростання магнітних потоків розсіювання ПМ і зниження корисного магнітного потоку взаємодуції.

На рис. 3 показано розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку уздовж полюсної поділки τ для двох варіантів ротора: рис. 3, а – ширина ПМ дорівнює $2/3\tau$; на рис. 3, б – $1/2\tau$. Хоча у другому варіанті індукція в повітряному проміжку дещо зростає (на 10 %), але корисний магнітний потік за рахунок меншої оберненої до повітряного проміжку площі ПМ зменшується в 1,5 рази. Цей результат підкреслює протиріччя, притаманні машинам з магнітоелектричним збудженням – конструктивні рішення по зменшенню пульсацій моменту одночасно призводять до зменшення середнього електромагнітного моменту і потужності двигунів. Це вимагає обґрунтування компромісних оптимальних технічних рішень. Ефективним рішенням щодо зниження пульсацій моменту є скіс пазів ротора або статора (простіше виконувати скіс пазів ротора). Через скіс осі пазів статора і ротора по-

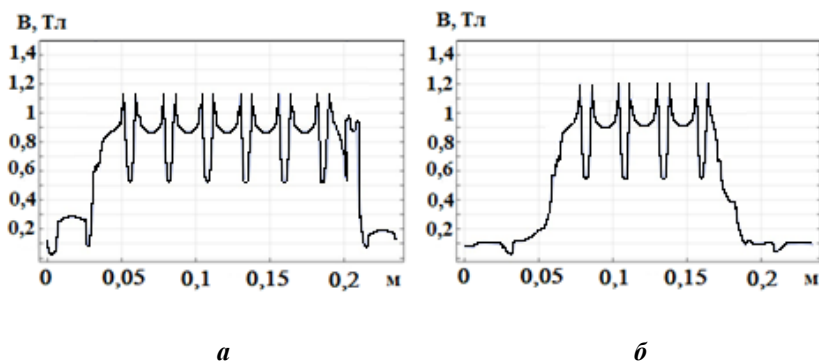


Рис. 3

зів ротора враховувався приблизно. Ротор по довжині розділявся на 4 частини і для кожного моменту часу склалися 4 криві електромагнітного моменту, зменшені в 4 рази, причому кожна крива моменту розраховувалася при повороті ротора відносно статора на кут $3,33^\circ$, що відповідає $1/3$ зубцевої поділки статора.

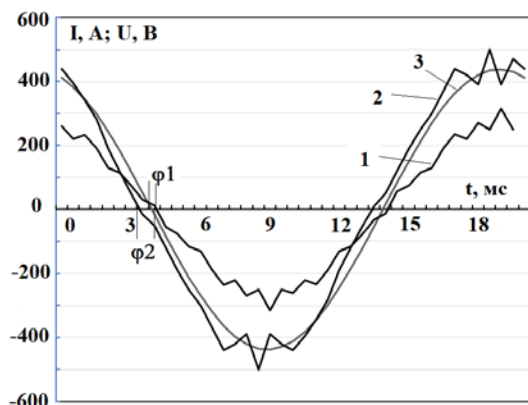


Рис. 4

Результати дослідження. На рис. 4 на інтервалі часу $0 \dots 0,02$ с (20 мс) зображено розраховані за виразом (8) часові залежності ЕРС в фазах А статора СРДПМ (крива 1), СДЗПМ (крива 2) і заданого за виразом (1) струму в фазі А статора (крива 3) в номінальному режимі роботи. За зазначених умов порівняння двигунів діюче значення ЕРС фази СДЗПМ складає 310 В, що в 1,44 рази вище, ніж в СРДПМ (215 В). ЕРС в СРД складає 185 В. З рис. 4 можна визначити $\cos(\varphi)$ в номінальних режимах. Зокрема, в СРДПМ $\cos(\varphi_1) = 0,96$ (індуктивний характер – струм відстає по часовій фазі від ЕРС), а в СДЗПМ $\cos(\varphi_2) = 0,94$ (ємнісний характер). В СРД $\cos(\varphi) = 0,87$ (індуктивний). Тобто за однакового струму статора і однакового об'єму ПМ конструкція СДЗПМ ефективніша, ніж СРДПМ.

На рис. 5 зображено часові залежності електромагнітного моменту. На рис. 5, а показано залежність для СРД, на рис. 5, б – для СРДПМ, на рис. 5, в – для СДЗПМ. Більш складний спектр пульсацій моменту в СРД і СРДПМ обумовлено наявністю потокових бар'єрів ротора.

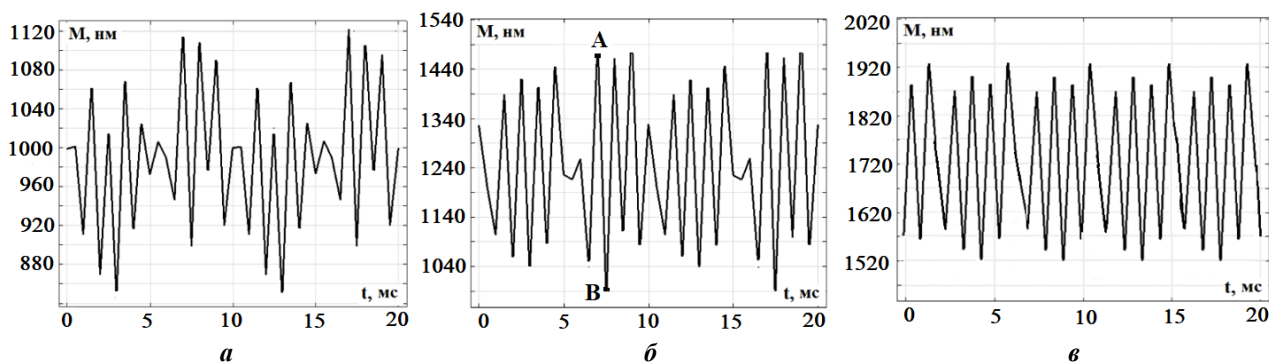


Рис. 5

Наведені залежності відповідають вихідним варіантам двигунів. В табл. 1 та 2 наведено характеристики моменту і потужності двигунів до та після їхньої оптимізації. Коефіцієнт пульсацій (12) характеризує амплітуду коливань моменту відносно його середнього значення, причому під час його розрахунку розглядається найбільше за амплітудою коливання. Наприклад, для СРДПМ (рис. 5, б) максимальний перепад моменту між точками А і В дорівнює 456 Нм, що при середньому моменті 1240 Нм відповідає амплітуді коливань 228 Нм і коефіцієнту пульсацій 0,184.

Часткова оптимізація двигунів виконувалася з метою зменшення пульсацій моменту, зокрема були застосовані такі конструктивні заходи: виконання напівзакритих пазів статора замість відкритих (відкриття пазів статора у напівзакритих пазах дорівнювало 50 % від ширини відкритих пазів); виконання осевого скошу пазів (магнітів) ротора на величину зубцевої поділки статора; скорочення кроку секцій обмотки статора (крок по пазам дорівнює 7). В СДЗПМ для зменшення пульсацій моменту ще застосовують профілювання феромагнітних проміжків (полюсів) між ПМ – під серединою полюсів повітряний проміжок має меншу висоту, ніж на краях полюсів. Але оскільки для СРД і СРДПМ таке профілювання є технологічно складним і недоцільним, то з метою адекватного порівняльного аналізу двигунів таке профілювання в СДЗПМ не розглядалося.

Таблиця 1

Двигун	Середній момент, Нм	Коефіцієнт пульсацій	Активна потужність, кВт	Фазна напруга живлення, В
СРД	955	0,114	150	185
СРДПМ	1240	0,184	195	215
СДЗПМ	1720	0,213	270	310

Таблиця 2

Двигун	Середній момент, Нм	Коефіцієнт пульсацій	Активна потужність, кВт	Фазна напруга живлення, В
СРД	860	0,068	136	168
СРДПМ	1130	0,117	178	200
СДЗПМ	1590	0,156	250	289

З наведених даних видно, що найбільші момент і потужність утворює СДЗПМ – його момент в 1,84 разів перевищує момент СРД та в 1,4 рази момент СРДПМ. Суттєво більший момент СДЗПМ у порівнянні з СРДПМ пояснюється ближчим розташуванням ПМ до повітряного проміжку, що зменшує їхні магнітні потоки розсіювання. Ця різниця залежить від марки та об'єму ПМ, розмірів поточкових бар'єрів ротора, діаметру ротора тощо, але у цілому таке співвідношення є характерним під час порівняння двигунів цих типів. Суттєво різними є фазні напруги живлення, потрібні для забезпечення однакового струму статора. Це пов'язано з необхідністю подолання проти-ЕРС в обмотці статора, яка індуквана магнітними потоками ПМ через обертання ротора. В таких же межах відрізняються і потужності двигунів, тобто найкращі питомі масо-габаритні показники (кВт/кг) має СДЗПМ. Задля отримання в СРД і СРДПМ такої ж потужності потрібно збільшувати їхні габарити або струм статора, що вимагає підсилення системи охолодження двигунів. Разом з тим найбільші пульсації моменту виникають також в СДЗПМ – максимальна амплітуда коливання моменту дорівнює (табл. 2) 248 Нм, в СРДПМ – 132 Нм, в СРД – 59 Нм. Це протиріччя між досяжною потужністю двигуна та рівнем пульсацій моменту потребує компромісних рішень з урахуванням інших умов функціонування двигунів (допустимі габарити, рівень шуму та вібрацій тощо). Зазначені заходи зі зниження пульсацій моменту дають змогу зменшити коефіцієнт пульсацій в 1,3...1,5 рази. Але при цьому відбувається помітне – на (8...10) % – зменшення середнього моменту і потужності двигунів. Це можна пояснити зменшенням ЕРС в обмотці статора внаслідок скошу пазів ротора, збільшенням магнітних потоків пазового розсіювання статора тощо.

Висновки. 1. Розроблено комплексну математичну модель і проведено порівняльний аналіз номінальних величин потужності та електромагнітного моменту трьох варіантів синхронних двигунів, призначених для використання в електротранспортних засобах: синхронного реактивного двигуна з пасивним ротором – СДР, синхронного реактивного двигуна з постійними магнітами на роторі – СРДПМ і синхронного двигуна з розташованими на поверхні ротора постійними магнітами – СДЗПМ. Порівняння проводилося за заданих однакових габаритів, номінального струму обмотки статора та швидкості обертання ротора.

2. Встановлено, що за вказаних однакових умов найбільшу потужність і електромагнітний момент має СДЗПМ – у порівнянні з СРД його потужність і момент більші в 1,84 разів. Варіант СРДПМ у порівнянні з СРД має більшу потужність і момент в 1,3 рази, тобто додавання ПМ в ротор СРД збільшує його потужність на 30%. Задля забезпечення однакової величини струму в обмотці статора напруга її живлення має змінюватися приблизно в таких же межах. Задля отримання однакової потужності потрібно збільшувати або габарити СРД і СРДПМ, або струм статора. Разом з тим найбільші пульсації моменту виникають також в СДЗПМ – максимальне коливання моменту майже в

4 рази більше, ніж в СРД і в 1,8 разів більше, ніж в СРДПМ. Чим кращим є двигун за питомими енергетичними показниками, тим гіршим він є за рівнем пульсацій моменту.

3. Застосування конструктивних заходів з метою зменшення пульсацій електромагнітного моменту дають змогу у всіх варіантах двигунів знизити коефіцієнт пульсацій в 1,3...1,5 рази. Але при цьому на (8...10) % зменшується потужність і середній момент двигунів.

4. Отримані результати можуть бути використані під час вибору доцільного типу синхронного тягового двигуна з урахуванням заданих компромісних вимог до характеристик двигунів і умов експлуатації транспортного засобу: для отримання найкращих масо-габаритних і енергетичних показників може бути застосований СДЗПМ; для зменшення вібрацій – СРДПМ. Для отримання найбільшої надійності експлуатації з урахуванням негативного впливу зовнішніх факторів (вологість, нагрів, вібрації) доцільним є використання СРД, незважаючи на їхні суттєво гірші енергетичні показники.

1. Jacek F. Gieras, Jian-Xin Shen. Modern Permanent Magnet Electric Machines. Theory and Control. CRC Press, 2023. 307 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003103073>.
2. Woldegiorgis A.T., Ge X., Zuo Y., Wang H., Hassan M. Sensor less Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Considering Resistance and Permanent Magnet Flux Linkage Variation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70. Issue 8. Pp. 7716-7730. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3224152>.
3. Brosch A., Wallscheid O., Böcker J. Model Predictive Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motors Using a Stator-Fixed Harmonic Flux Reference Generator in the Entire Modulation Range. *German Research Foundation (DFG) under the reference number BO 2535/20-1*. 2022. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.21590766.v1>.
4. Raja Ram Kumar, Priyanka Devi, Chandan Chetri, Ankita Kumari, Papu Moni Saikia, Ram Khelawan Saket, Kundan Kumar, Baseem Khan. Performance analysis of dual stator six-phase embedded-pole permanent magnet synchronous motor for electric vehicle application. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2023. Vol. 13. Issue 1. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12063>.
5. Muhammad R.Z., Junaid I., Saleem I.S., Syed S.H., Salman A., Marignetti F. Performance Improvement of Axial Flux Permanent Magnet Machine with Phase Group Concentrated Coil Winding. *Energies*. 2022. Vol. 15 (19). Issue 7337. Pp. 2-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197337>.
6. Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2015. Vol. 1. Issue 3. Pp. 245-254. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092>.
7. Bianchini C., Bisceglie G., Torreggiani A., Davoli M., Macrelli E., Bellini A., Frigieri M. Effects of the Magnetic Model of Interior Permanent Magnet Machine on MTPA, Flux Weakening and MTPV Evaluation. *Machines*. 2023. Vol. 11(1). Issue 77. Pp. 2-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11010077>.
8. Grebenikov V.V., Gamaliia R.V., Dadychyn S.A. Comparative analysis of magnetic systems of permanent magnet motors for tram. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 27-37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.027>.
9. Stipetic S., Zarko D., Kovacic M. Optimized design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor series using combined analytical–finite element analysis based approach. *IET Electric Power Applications*. 2016. Vol. 10. No 5. Pp. 330-338. DOI: <https://doi.org/10.1049/IET-EPA.2015.0245>.
10. Любарський Б.Г., Овер'янова Л.В., Рябов Є.С., Якунін Д.І., Островерх О.О., Воронін Ю.В. Оцінка головних розмірів тягового синхронно-реактивного електродвигуна з постійними магнітами. *Електротехніка і електромеханіка*. 2021. № 2. С. 3-8. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.01>.
11. Васьковський Ю.М., Гайденко Ю.А. Дослідження електромагнітних процесів в синхронних машинах з постійними магнітами на основі коло-польових математичних моделей. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 47-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.047>.
12. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Способы уменьшения пульсаций электромагнитного момента в электрических машинах с постоянными магнитами и зубцово-пазовым статором. *Праці ІЕД НАН України*. 2010. Вип. 27. С. 52-58.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF SYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC MOTORS

Yu.M. Vaskovsky, V.V. Pavluk

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: yun157@gmail.com; 2812vova@gmail.com.

Using the methods of mathematical modeling, a comparative analysis of the electromagnetic torque and power characteristics of three versions of traction synchronous motors was carried out: a synchronous jet engine, a hybrid synchronous jet engine with additional permanent magnets on the rotor, and a synchronous engine with permanent magnets installed on the rotor surface. The comparative analysis was carried out under the conditions of the same dimensions of the engines, the nominal values of the stator winding current and the speed of rotation of the rotor. It was established that under the given conditions, the synchronous motor with permanent magnets on the surface develops the greatest power and torque, but it also has the largest torque pulsations. Design measures to reduce torque pulsations at the same time led to a noticeable decrease in the nominal power of engines. The obtained results can be used when choosing an appropriate type of synchronous traction motor, taking into account the given compromise requirements for engine characteristics and vehicle operating conditions. References 12, figures 5, table 2.

Key words: traction synchronous motor, rotor permanent magnets, electromagnetic moment, pulsations of electromagnetic moment.

1. Jacek F. Gieras, Jian-Xin Shen. Modern Permanent Magnet Electric Machines. Theory and Control. CRC Press, 2023. 307 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003103073>.
2. Woldegiorgis A.T., Ge X., Zuo Y., Wang H., Hassan M. Sensor less Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Considering Resistance and Permanent Magnet Flux Linkage Variation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70. Issue 8. Pp. 7716-7730. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3224152>.
3. Brosch A., Wallscheid O., Böcker J. Model Predictive Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motors Using a Stator-Fixed Harmonic Flux Reference Generator in the Entire Modulation Range. *German Research Foundation (DFG) under the reference number BO 2535/20-1*. 2022. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.21590766.v1>.
4. Raja Ram Kumar, Priyanka Devi, Chandan Chetri, Ankita Kumari, Papu Moni Saikia, Ram Khelawan Saket, Kundan Kumar, Baseem Khan. Performance analysis of dual stator six-phase embedded-pole permanent magnet synchronous motor for electric vehicle application. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2023. Vol. 13. Issue 1. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12063>.
5. Muhammad R.Z., Junaid I., Saleem I.S., Syed S.H., Salman A., Marignetti F. Performance Improvement of Axial Flux Permanent Magnet Machine with Phase Group Concentrated Coil Winding. *Energies*. 2022. Vol. 15 (19). Issue 7337. Pp. 2-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197337>.
6. Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2015. Vol. 1. Issue 3. Pp. 245-254. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092>.
7. Bianchini C., Bisceglie G., Torreggiani A., Davoli M., Macrelli E., Bellini A., Frigieri M. Effects of the Magnetic Model of Interior Permanent Magnet Machine on MTPA, Flux Weakening and MTPV Evaluation. *Machines*. 2023. Vol. 11(1). Issue 77. Pp. 2-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11010077>.
8. Grebenikov V.V., Gamaliia R.V., Dadychyn S.A. Comparative analysis of magnetic systems of permanent magnet motors for tram. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 5. Pp. 27-37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.027>.
9. Stipetic S., Zarko D., Kovacic M. Optimized design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor series using combined analytical–finite element analysis based approach. *IET Electric Power Applications*. 2016. Vol. 10. No 5. Pp. 330-338. DOI: <https://doi.org/10.1049/IET-EPA.2015.0245>.
10. Lyubarskyi B.G., Overianova L.V., Ryabov E.S., Yakunin D.I., Ostroverkh O.O., Voronin Yu.V. Evaluation of the main dimensions of traction synchronous jet electric motor with permanent magnets. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2021. No 2. Pp. 3-8. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.01>. (Ukr)
11. Vaskovsky Yu. M., Haydenko Yu. A. Research of electromagnetic processes in synchronous machines with permanent magnets based on circle-field mathematical models. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 47-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.047>. (Ukr)
12. Grebenikov V.V., Pryimak M.V. Ways to reduce pulsations of the electromagnetic moment in electric machines with permanent magnets and a tooth-groove stator. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii nauk Ukrainy*. 2010. Vyp. 27. Pp. 52-58. (Rus)

Надійшла 06.03.2023

Остаточний варіант 20.04.2023