

УДК 621.313:621.314

doi:10.20998/2413-4295.2021.03.01

ПРИНЦИП ФОРМУВАННЯ МОМЕНТУ ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ ПУЛЬСАЦІЄЮ У ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОМУ ДВИГУНІ З П-ПОДІБНИМИ ПОЛЮСАМИ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ*, М. О. ЛУК'ЯНОВ, Ю. В. БОНДАРЕНКО

кафедра електронних пристроїв та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, УКРАЇНА

*e-mail: verbitskiy@bigmir.net

АНОТАЦІЯ У статті проаналізовано типи двигунів для транспортних засобів і виокремлено вентильно-індукторний тип двигуна, як той що має просту конструкцію, високу надійність та низьку ціну. Наведено принцип роботи вентильно-індукторних двигунів (ВІД) та їхньої модифікації. Однак широке використання ВІД у транспортних засобах гальмується низьким питомим моментом та його великою пульсацією. Для збільшення питомого моменту запропоновано спарену намотку обмоток на сусідні стрижні П-подібних полюсів статора. Показано принцип формування обертальної сили та запропоновано оцінку ефективності використання електроенергії для її формування. У програмному середовищі COMSOL Multiphysics проаналізовано переваги і недоліки використання П-подібних полюсів із трапецеїдальним і прямокутним профілем, та обрано останній через забезпечення більшого моменту при однакових габаритах. Показано, що ширина стрижнів полюса з прямокутним профілем для забезпечення максимального моменту повинна становити близько третини від ширини основи полюса. Наведено типову форму струму обмотки полюса, що мінімізує пульсацію моменту. Обґрунтовано доцільність проектування спеціалізованого електроприводу для запропонованої топології ВІД та синтезу для нього закону керування, що забезпечує необхідне значення моменту з мінімальною пульсацією. Як результат проведених досліджень було зроблено висновки щодо можливості здешевлення технології ВІД при використанні модульної структури на основі П-подібних полюсів зі спареною намоткою обмоток на полюсах статора, за якої обмотки намотуються на стрижні одразу двох сусідніх полюсів, що дозволяє компактно розміщувати їх у вікні полюса без використання додаткового простору і відповідно забезпечує більшу щільність розташування полюсів. Моделювання процесу формування моменту в полюсах двигуна в програмному середовищі COMSOL Multiphysics засвідчило переваги використання полюсів з прямокутним профілем у порівнянні з полюсами трапецеїдального типу та підтвердило доцільність використання полюсів з шириною стрижнів, що складають близько третини ширини основи полюса.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун; П-подібні полюси; мінімізація пульсації моменту; регульований електропривод

PRINCIPLE OF TORQUE FORMATION WITH REDUCED PULSATION IN SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH U-SHAPED POLES

I. VERBYTSKYI, M. LUKIANOV, Y. BONDARENKO

Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT In the paper the types of motors for vehicles and highlights the switched reluctance motor type as one that has a simple design, high reliability and low cost. The principle of operation of switched reluctance motors (SRM) and their modifications are given. However, the widespread use of SRM in vehicles is constrained by the low specific torque and its high ripple. To increase the specific torque, a paired winding of windings on adjacent rods of U-shaped stator poles is proposed. The principle of formation of rotational force is shown and the estimation of efficiency of use of the electric power for its formation is offered. The COMSOL Multiphysics software environment analyzes the advantages and disadvantages of using U-shaped poles with a trapezoidal and rectangular profile, and selected the latter because of the greater torque at the same dimensions. It is shown that the width of the pole rods with a rectangular profile to ensure maximum torque should be about a third of the width of the base of the pole. A typical form of current of the pole winding, which minimizes the pulsation of the moment, is analyzed. The expediency of designing a specialized electric drive for the proposed topology of SRM and synthesis for it of the control law, which provides the required value of the moment with minimal ripple, is substantiated. As usual, to ensure the constant moment generated by the pole in a certain sector it is necessary to form a current of near trapezoidal shape in the pole winding. As a result of the research, conclusions were made about the possibility of reducing the cost of SRM technology when using a modular structure based on U-shaped poles with paired winding at the stator poles, in which the windings are wound on the rod of two adjacent poles, which allows them to be placed compactly the use of additional space and, accordingly, provides a greater density of the poles. Modeling the process of forming the torque of the motor in the COMSOL Multiphysics software environment showed the advantages of using poles with a rectangular profile compared to trapezoidal poles and confirmed the feasibility of using poles with a rod width of about a third of the pole base width.

Keywords: switched reluctance motor; U-shaped poles; torque pulsation minimization; adjustable electric drive

Вступ

Впродовж останніх десятиліть відбувається поступовий перехід транспортних засобів на

електричну тягу. При цьому, залежно від їхньої потужності, маневрових, тягових та експлуатаційних характеристик, обираються різні типи електричних двигунів. Для міського транспорту з потужністю сотні

кіловат найчастіше використовуються двигуни постійного струму, що підключаються безпосередньо до електромережі живлення постійного струму 550–600 В [1]. Проте останнім часом вони витісняються асинхронними двигунами, які, хоч і потребують ланки перетворення постійної напруги на змінну, але мають більшу надійність та кращу керованість у динамічних режимах [1,2]. В електромобілях, що мають потужність десятки кіловат, частіше використовуються двигуни на постійних магнітах і лише в деяких випадках, для покращення динамічних характеристик – асинхронні двигуни. У малопотужних транспортних засобах – електровелосипедах, електросамокатах, моноколесах – застосовуються виключно двигуни на постійних магнітах, які при всіх своїх перевагах, як то плавне регулювання частоти, невеликі маса та габарити, високий коефіцієнт корисної дії, висока перевантажувальна здатність, мають відносно складну конструкцію через велику кількість полюсів, менший питомий момент, що визначає посередні динамічні характеристики транспортних засобів на їх основі, та високу вартість, зумовлену використанням рідкоземельних металів у якості магнітів [3].

Однією із модифікацій двигунів на постійних магнітах є вентильно-індукторні двигуни (ВІД), що мають простішу конструкцію, вищу надійність та виготовляються з використанням електротехнічної сталі або феромагнітних матеріалів і тому є значно дешевшими [1,4]. Через свої переваги ВІД розглядаються як альтернатива двигунам на постійних магнітах, однак їх широке використання у транспортних засобах стримується низьким питомим моментом та його великою пульсацією.

У роботі [5] запропоновано нову конструкцію ВІД на основі П-подібних полюсів (рис. 1а). Проблему зменшення пульсації моменту ВІД досліджено в роботі [6] за допомогою спрощеної лінійної моделі двигуна і було вирішено шляхом вибору співвідношення пар полюсів П-подібної форми статора і ротора та формування струму спеціальної форми в обмотках статора. Отримані результати можуть бути основою для розрахунку параметрів двигуна та його структури, однак при цьому потрібно мати на увазі, що через спрощену модель ВІД момент двигуна матиме нижчі абсолютні значення та доволі високу пульсацію у порівнянні з теоретично можливими показниками.

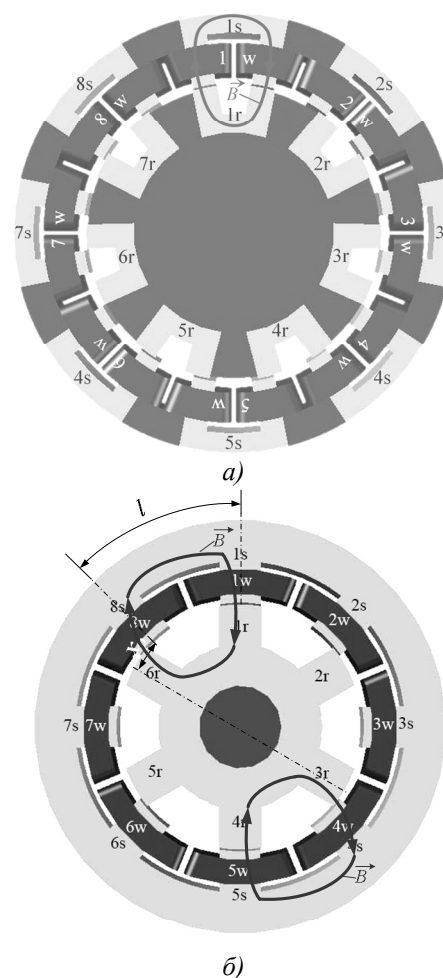
Мета роботи

Досягти максимізації моменту ВІД, збільшення коефіцієнту використання енергії та мінімізації пульсації моменту двигуна. Забезпечити досягнення означеної мети планується завдяки вибору топології та форми полюсів статора, які дозволяють ефективно використовувати простір двигуна, а також завдяки застосуванню спеціальної форми струму обмоток полюсів. Для проведення досліджень пропонується

нелінійна модель електромагнітних процесів в полюсах ВІД, реалізована в пакеті моделювання COMSOL Multiphysics [7].

Вибір топології полюсів статора

У дослідженні [5] показано, що для мінімізації пульсації моменту двигуна з П-подібними полюсами при збереженні достатнього значення питомого моменту полюси потрібно розташовувати у такій пропорції: n полюсів на роторі та $n + 1$ полюс на статорі, де n – будь-яке ціле число більше за одиницю, $n > 1$ (рис. 1а). Проте, за такого співвідношення між кількістю полюсів статора і ротора, для розміщення обмотки на полюсах статора необхідно передбачити додатковий простір, що може бути здійснено за рахунок зменшення або радіусу ротора, або щільності розташування полюсів статора, що призводить до зниження питомого моменту.

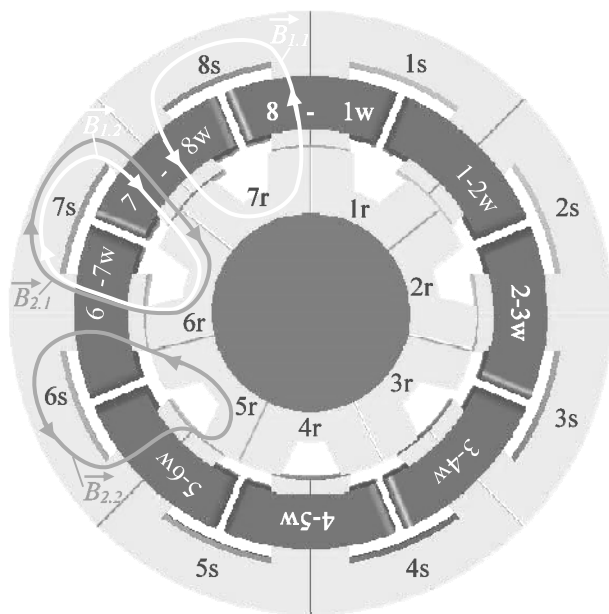


$1s, 2s, \dots$ – полюси статора, $1r, 2r, \dots$ – полюси ротора,
 $1w, 2w, \dots$ – обмотки полюсів статора

Рис. 1 – Топологія ВІД:
а) ВІД на основі П-подібних полюсів;
б) типова структура ВІД

Для запобігання зниженню питомого моменту пропонується використовувати спарену намотку обмоток на полюсах статора (рис. 2), за якої обмотки намотуються на стрижні одразу двох сусідніх полюсів, що дозволяє компактно розмішувати їх у вікні полюса без використання додаткового простору і відповідно забезпечує більшу щільність розташування полюсів. При цьому слід зауважити:

- обмотка за спареної намотки створює магнітний потік одразу в двох полюсах, і це необхідно враховувати при розробці алгоритму керування;
- спарені П-подібні полюси магнітно ізольовані між собою, тому розподіл магнітного потоку між ними відрізняється від розподілу потоку у полюсі ВІД з типовою конструкцією.



1s, 2s, .. – полюси статора, 1r, 2r, .. – полюси ротора,
1-2w, 2-3w.. – спарені обмотки полюсів статора

Рис. 2 – Топологія ВІД зі щільним розміщенням полюсів статора

У запропонованій топології ВІД, що зображена на рис. 2, у порівнянні з класичною топологією ВІД, зображеною на рис. 1 б, полюси статора і ротора мають модульну структуру і можуть виготовлятися окремо за дешевшою технологією.

При цьому, загалом тяговий момент запропонованої конструкції та його пульсація є такими ж як і у класичного ВІД. Тому, для збільшення моменту та зменшення його пульсації є доцільним: аналіз форми полюсів, що забезпечують найбільше значення моменту та регулювання форми струму обмоток статора. Проаналізуємо вказані способи підвищення моменту.

Вибір профілю полюсів ВІД

Як було зазначено, основним недоліком ВІД є

доволі низький питомий момент та його значна пульсація, зумовлені постійним зміщенням позицій полюсів статора і ротора і відповідно постійною зміною його моменту.

Для збільшення магнітного моменту та мінімізації його пульсації проаналізуємо фактори, що впливають на ці параметри.

Для спрощення аналізу розглянемо систему, що складається з трьох П-подібних полюсів – двох полюсів ротора 1r і 2r та одного полюса статора 1s з обмоткою 1w (рис. 3), що відповідає сектору базової топології ВІД, зображеної на рис. 1а. Процеси, що протікають в модифікованій топології, зображеній на рис. 2, є дещо складнішими, однак в основному подібні до зображеної на рис. 3 моделі.

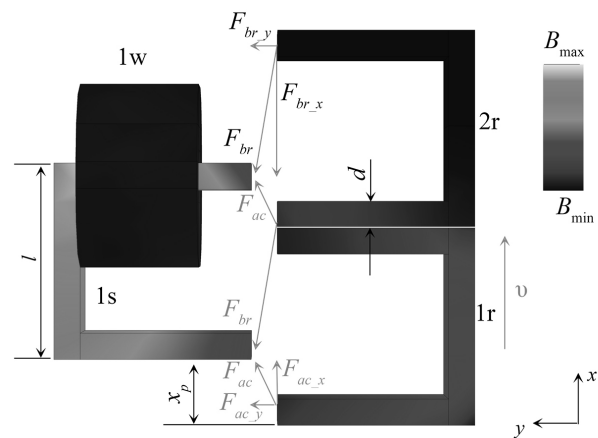


Рис. 3 – Система з трьох П-подібних полюсів – двох полюсів ротора 1r і 2r та одного полюса статора 1s з обмоткою 1w

Градентом кольору на рис. 3 показано розподіл значення індукції B у полюсах. Як видно з рисунку, в полюсі статора індуктується магнітний потік, який розподіляється між двома полюсами ротора. Частина магнітного потоку, що замикається через полюс ротора 1r, продукує силу F_{ac} , компонента якої $F_{ac,x}$ створює обертальний момент, напрям вектору якого збігається з напрямом швидкості v . При цьому частина магнітного потоку, що замикається через полюс 2r, створює протилежно направлену гальмівну силу $F_{br,x}$. Втім за даного взаємного розташування полюсів $F_{ac,x} > F_{br,x}$, значення яких обернено-пропорційні відстані між полюсами, тому ротор обертається в потрібному напрямку. Компоненти сил $F_{ac,y}$ і $F_{br,y}$ притягують полюси статора і ротора один до одного та не виконують корисної роботи.

У даному випадку електромагнітний момент ВІД M є добутком сумарної обертальної сили F_{rot} та радіусу ротора R :

$$M = F_{rot} R. \quad (1)$$

Сила F_{rot} є різницею сил $F_{ac,x}$ і $F_{br,x}$:

$$F_{rot} = (F_{ac_x} - F_{br_x}), \quad (2)$$

i є набагато меншою, ніж теоретично можлива сила F , що визначається магнітною індукцією B та площею поперечного перерізу полюса S_g [8]:

$$F = \frac{S_g B^2}{2\mu_0}, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна константа.

При цьому можна ввести коефіцієнт використання електромагнітної енергії ВІД η :

$$\eta = \frac{F_{rot}}{F} = \frac{F_{ac_x} - F_{br_x}}{F}. \quad (4)$$

З формули (4) стає очевидним, що показник η є невисоким, чим і пояснюється низький питомий момент у ВІД. До того ж слід зазначити, що реальний коефіцієнт використання η є ще меншим, оскільки при його визначенні за формулою (4) не враховані наступні явища: потік розсіювання, утворений у полюсі статора, насичення магнітопроводу та втрати енергії в обмотці полюса. Окрім цього коефіцієнт η залежить від взаємного положення полюсів, що визначається параметром x_p , $\eta = f(x_p)$, тому при постійному струмі обмоток полюса статора для певних значень x_p ефективність використання електроенергії має критично малі значення, що зумовлює значну пульсацію моменту двигуна та низьку ефективність використання електроенергії.

Одним зі шляхів підвищення моменту та зменшення пульсації є оптимізація форми полюсів, що пропонується в ряді досліджень [9,10]. Альтернативою цьому є формування струму в обмотках статора за спеціальним законом [11,12]. Далі досліджено реалізацію цих двох підходів.

При використанні полюсів з прямокутним профілем спостерігається значна нерівномірність розподілу магнітного потоку та зменшення моменту ВІД через високу концентрацію поля на кромках полюсів, як показано на рис. 4, що зумовлює насичення матеріалу полюса в цих ділянках і, як наслідок, зменшення моменту та коефіцієнта використання енергії η . Додаткове зменшення коефіцієнту η відбувається, якщо відстань між полюсами x_p (рис. 3) не перевищує ширини полюса d , оскільки в цьому випадку компонента сили вздовж осі x , F_x , яка виконує корисну роботу, є значно меншою компоненти F_y ($F_x \ll F_y$).

Для усунення цього недоліку в ряді досліджень для топології ВІД (рис. 1 б) пропонується використовувати більш складну форму полюсу, як правило, трапецеїдальну з розширеним профілем (рис. 5 а). Така форма полюсу дійсно дозволяє розвинути значний момент на більшій ділянці сектору обертання за рахунок збільшення індуктивності

системи «полюс статора – полюс ротора», однак вона має такі недоліки: зменшення коефіцієнта використання енергії η на ділянках перетину полюсів, зумовлене значним зростанням компоненти сили F_y у порівнянні з компонентою F_x , ($F_x \ll F_y$), а також насичення матеріалу полюсів на кромках (рис. 4).

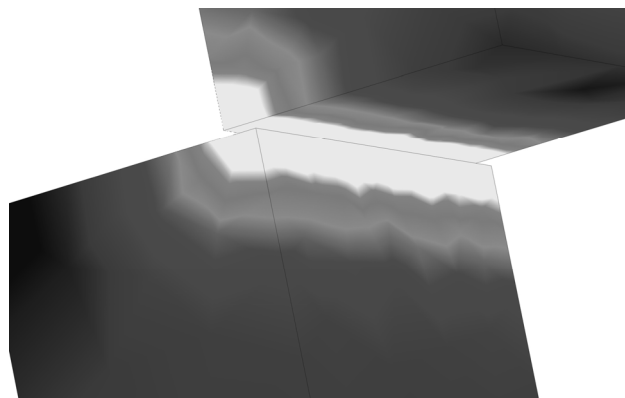


Рис. 4 – Ілюстрація концентрації поля на кромках полюсів з прямокутним профілем

Для пропонованої структури ВІД, яка складається з П-подібних полюсів, такий підхід має додатковий недолік, пов'язаний з істотним зростанням потоку розсіювання поля статора через значне зменшення відстані між стрижнями полюсів на ділянках розширення полюса, що унеможливило використання такої форми полюса. Тому доцільним представляється також аналіз трапецеїдального полюса зі звуженим профілем, зображеного на рис. 5б.

Грані полюса найбільш раціонально формувати під кутом 45° розміром у половину ширини полюса $d/2$. Тоді щільність індукції на грані полюса буде майже однаковою, оскільки грані двох полюсів утворюють еквідистантні поверхні. Проте слід звернути увагу, що при використанні полюсу трапецеїдального типу зі звуженим профілем збільшується ефективна ширина зазору. Отже вибір форми полюса, який забезпечує найбільші значення коефіцієнта η та моменту, а також дозволяє мінімізувати пульсацію, доцільно здійснювати з використанням математичної моделі полюсів статора і ротора ВІД, створеної у середовищі Comsol Multiphysics.

Аналіз форми полюсів в Comsol Multiphysics

Програмне середовище моделювання Comsol Multiphysics використано для аналізу розподілу індукції в осерді і формування обертальної сили. При цьому сумарна сила F , що може формуватися в полюсі статора, розраховується на основі формули (3). Оскільки в осерді індукція B є функцією трьох просторових координат, $B = f(x,y,z)$, формула (3) перетвориться наступним чином:

$$F = \frac{\iint_S B(x, y, z_0)^2 dx dy}{2\mu_0}, \quad (5)$$

де S – поверхня рівня при $z = z_0$, що перетинає полюс статора в площині найбільшої щільності індукції, як показано на рис. 6.

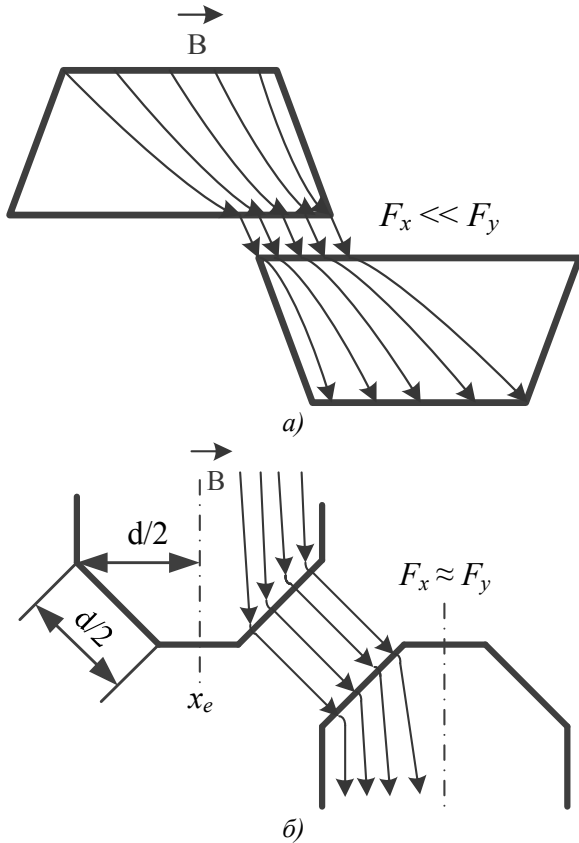


Рис. 5 – Профілі полюсів:
а) полюс трапецеїдального типу з розширеним профілем;
б) полюс трапецеїдального типу зі звуженим профілем

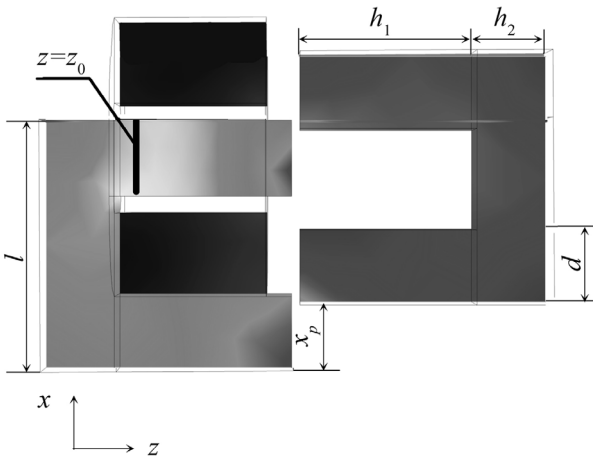


Рис. 6 – Ілюстрація до вибору поверхні інтегрування індукції

Спочатку проаналізуємо залежність коефіцієнта використання η і обертальної сили F_{rot} від ширини стрижнів d П-подібних полюсів та їх взаємного зміщення x_p (рис. 6). Для цього введемо нормований параметр зміщення x^* :

$$x^* = \frac{x_p}{l}, \quad (6)$$

де l – довжина основи полюса. При цьому залежності $\eta(x^*)$ і $F_{rot}(x^*)$ отримано для інтервалу $x^* \in [0; 0.5]$, для якого обертальна сила F_{rot} направлена в потрібному напрямку, та ширини стрижня полюса $d = 2l/15, 4l/15, 5l/15, 6l/15, l = 15$ мм, товщина полюса $w = 1$ мм, висота стрижня $h_1 = 15$ мм, ширина основи полюса $h_2 = 4.5$ мм. Залежності $\eta(x^*)$ і $F_{rot}(x^*)$ при постійному струмі обмотки полюса статора наведено на рис. 7.

З рис. 7а видно, що поступове збільшення ширини стрижня d спочатку дає позитивний ефект і абсолютне значення сили F_{rot} зростає з інтервалом по координаті x^* , Δx^* , де обертальна сила не менш ніж 70 % від її максимального значення. Однак при перевищенні значення третини довжини основи полюса l , $d = 5$ мм, подальше збільшення параметра d хоча і призводить до збільшення параметра Δx^* , однак абсолютні значення обертальної сили та ефективності починають суттєво знижуватись. Тому при використанні полюсів прямокутної форми зона ефективного керування Δx^* є невисокою і не перевищує 20 % від довжини полюса l . Подальше збільшення зони керування Δx^* є можливим при суттєвому зменшенні коефіцієнта використання енергії.

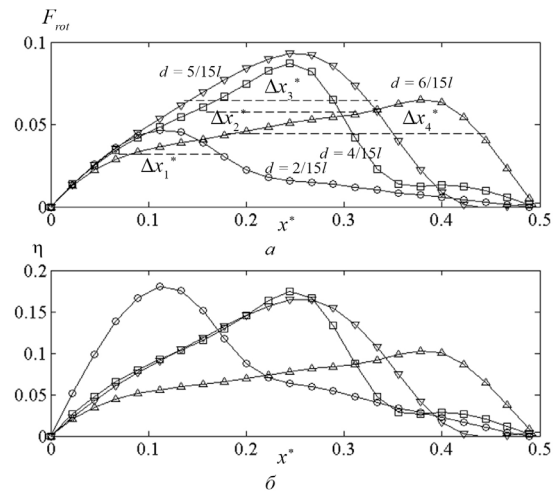


Рис. 7 – Залежності: а) $\eta(x^*)$;
б) $F_{rot}(x^*)$ для полюсів з прямим профілем

На рис. 8 показано порівняння формування обертальної сили F_{rot} та ефективності використання енергії η полюса з прямокутним профілем (крива 1), полюса трапецеїдального типу з розширеним профілем (крива 2) та полюса трапецеїдального типу зі звуженим профілем (крива 3).

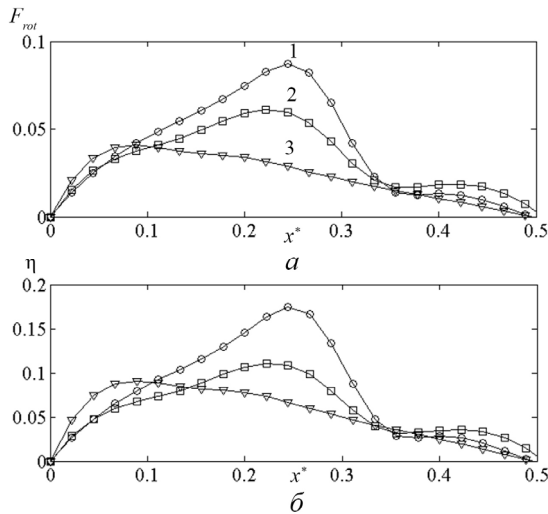


Рис. 8 – Порівняння залежностей: а) $\eta(x^*)$; б) $F_{rot}(x^*)$ полюсів з прямокутним профілем (крива 1), полюса трапецеїдального типу з розширеним профілем (крива 2) та полюса трапецеїдального типу зі звуженим профілем (крива 3)

Аналізуючи рис. 8, можна зробити висновок, що для запропонованої конструкції двигуна доцільно використовувати полюси з прямокутним профілем, оскільки вони забезпечують найбільшу обертальну силу та коефіцієнт використання енергії. При цьому слід зазначити, що зниження обертальної сили полюса трапецеїдального типу зі звуженим профілем пов'язане зі збільшенням ефективної ширини повітряного зазору, а полюса трапецеїдального типу з розширеним профілем – зі збільшенням потоку розсіювання.

Для збільшення коефіцієнта використання електроенергії і зменшення пульсації моменту доцільно регулювати значення обертальної сили F_{rot} , змінюючи за спеціальним законом струм обмотки. Оскільки значення індукції B є пропорційним струму обмотки, сила F_{rot} є пропорційною квадрату значення струму i , $B \sim i^2$, формула (3). Тому для забезпечення постійного моменту, створюваного полюсом у певному секторі Δx , необхідно формувати в обмотці полюса струм типової форми, зображений на рис. 9.

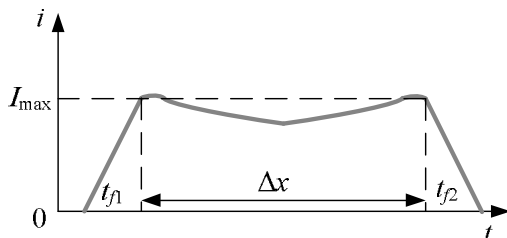


Рис. 9 – Струм полюса статора, що забезпечує постійне значення обертальної сили F_{rot}

Форма струму, зображена на рис. 9, складається з ділянок наростання і спадання фронту імпульсу t_{f1} і t_{f2} відповідно, наявність яких зумовлена

тим, що полюс статора є індуктивним навантаженням, та пологої ділянки струму, з максимальними значеннями на межах сектора керування, що забезпечує формування необхідного моменту та зменшує обсяг втрат в осерді та обмотках полюса.

Зважаючи на специфічну форму струму обмотки полюса, для зменшення пульсації моменту та збільшення коефіцієнту використання енергії також необхідно спроектувати спеціалізований електропривод для запропонованої топології ВІД та синтезувати для нього закон керування.

Висновки

Для здешевлення технології вентиляційно-індукторних двигунів пропонується використовувати модульну структуру ВІД на основі П-подібних полюсів зі спареною намоткою обмоток на полюсах статора, за якої обмотки намотуються на стрижні одразу двох сусідніх полюсів, що дозволяє компактно розміщувати їх у вікні полюса без використання додаткового простору і відповідно забезпечує більшу щільність розташування полюсів.

Моделювання процесу формування моменту в полюсах двигуна в програмному середовищі COMSOL Multiphysics засвідчило переваги використання полюсів з прямокутним профілем у порівнянні з полюсами трапецеїдального типу та підтвердило доцільність використання полюсів з шириною стрижнів, що складають близько третини ширини основи полюса.

Для забезпечення необхідної форми струму обмотки полюса, що дозволяє зменшити пульсації моменту та збільшити коефіцієнт використання енергії, необхідно спроектувати спеціалізований електропривод для запропонованої топології ВІД та синтезувати для нього закон керування.

Список літератури

1. Nuca I., Todos P., Esanu V. Urban electric vehicles traction: Achievements and trends. *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*. 2012. doi:10.1109/icepe.2012.6463948.
2. Sieklucki G. An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model S Vehicle. *2018 International Symposium on Electrical Machines (SME)*. 2018. doi:10.1109/isem.2018.8442648
3. Wang B., Liu Y., Vakil G., Yang T., & Zhang Z. Feasibility of Permanent Magnet Fault Tolerant Machines for Aircraft Starter/Generator Systems. *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2020. doi:10.1109/icem49940.2020.9270965.
4. Vijayakumar K., Karthikeyan R., Paramasivam S., Arumugam R., & Srinivas K. N. Switched Reluctance Motor Modeling, Design, Simulation, and Analysis: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2008. 44(12). P. 4605–4617. doi:10.1109/tmag.2008.2003334.
5. Лук'янов М. О., Вербицький Є. В. Особливості проектування і керування вентиляційно-індукторним двигуном з мінімізацією пульсації моменту.

- Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2020. № 25(1). Р. 20–26. doi: 10.20535/2523-4455.me.198991.
- Verbytskyi I., Bondarenko O., Lukianov M.; Zhuikov V., Pires F. High Frequency Modular Electric Drive for Switched Reluctance Motor with Reduced Torque Ripple. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 2020. doi: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236601.
 - Marcşa D., Kuczmann M. Design and control for torque ripple reduction of a 3-phase switched reluctance motor. *Computers & Mathematics with Applications*. 2017. 74(1), P. 89–95. doi: 10.1016/j.camwa.2017.01.001.
 - Нейман Л. А., Нейман В. Ю. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 2(97). С. 214–218.
 - Ding W., Liu G., Li P. A Hybrid Control Strategy of Hybrid-Excitation Switched Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction and Constant Power Extension. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 1–1. doi: 10.1109/tie.2019.2891467.
 - Kabir M. A., Husain I. Segmented rotor design of concentrated wound switched reluctance motor (SRM) for torque ripple minimization. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2016. doi:10.1109/ecce.2016.7855420.
 - Lee D.-H., Pham T. H., Ahn J.-W. Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. 60(9). P. 3637–3643. doi: 10.1109/tie.2012.2208432.
 - Abdel-Fadil, R., Szamel, L. Enhancement Of the Switched Reluctance Motor Performance for Electric Vehicles Applications Using Predictive Current Control. *2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*. 2018. doi:10.1109/cando-epe.2018.8601168.
 - doi:10.1109/icem49940.2020.9270965.
 - Vijayakumar K., Karthikeyan R., Paramasivam S., Arumugam R., Srinivas K. N. Switched Reluctance Motor Modeling, Design, Simulation, and Analysis: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, 44(12), pp. 4605–4617. doi:10.1109/tmag.2008.2003334.
 - Lukianov M. O., Verbytskyi I. V. Osoblyvosti proektuvannya i keruvannya ventylno-inductornym dvygunom z minimizatsiyeyu pulsatsiyi momentu [Design and control features of switched-reluctance motor with minimization torque pulsation]. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 2020, № 25(1), pp. 20–26, doi: 10.20535/2523-4455.me.198991.
 - Verbytskyi I., Bondarenko O., Lukianov M.; Zhuikov V., Pires F. High Frequency Modular Electric Drive for Switched Reluctance Motor with Reduced Torque Ripple. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 2020, doi: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236601.
 - Marcşa D., Kuczmann M. Design and control for torque ripple reduction of a 3-phase switched reluctance motor. *Computers & Mathematics with Applications*, 2017, 74(1), pp. 89–95, doi: 10.1016/j.camwa.2017.01.001.
 - Neiman L. A., Neiman V. Y. Primenenie metoda provodimostey dlya ucheta sily odnostoronnego magnitnogo prityazhenia assimetrichnogo electromagnita [Application of the method of conductivity to take into account the force of one-sided magnetic attraction of an asymmetric electromagnet]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta*, 2015, № 2(97), pp. 214–218.
 - Ding W., Liu G., Li P. A Hybrid Control Strategy of Hybrid-Excitation Switched Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction and Constant Power Extension. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 1–1, doi: 10.1109/tie.2019.2891467.
 - Kabir M. A., Husain I. Segmented rotor design of concentrated wound switched reluctance motor (SRM) for torque ripple minimization. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, doi:10.1109/ecce.2016.7855420.
 - Lee D.-H., Pham T. H., Ahn J.-W. Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9), pp. 3637–3643, doi: 10.1109/tie.2012.2208432.
 - Abdel-Fadil R., Szamel L. Enhancement Of the Switched Reluctance Motor Performance for Electric Vehicles Applications Using Predictive Current Control. *2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, 2018, doi:10.1109/cando-epe.2018.8601168.

References (transliterated)

- Nuca I., Todos P., Esanu V. Urban electric vehicles traction: Achievements and trends. *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 2012, doi:10.1109/icepe.2012.6463948.
- Sieklucki G. An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model S Vehicle. *2018 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, 2018, doi:10.1109/isem.2018.8442648
- Wang B., Liu Y., Vakil G., Yang T., Zhang Z. Feasibility of Permanent Magnet Fault Tolerant Machines for Aircraft Starter/Generator Systems. *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020,
- Lee D.-H., Pham T. H., Ahn J.-W. Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9), pp. 3637–3643, doi: 10.1109/tie.2012.2208432.
- Abdel-Fadil R., Szamel L. Enhancement Of the Switched Reluctance Motor Performance for Electric Vehicles Applications Using Predictive Current Control. *2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, 2018, doi:10.1109/cando-epe.2018.8601168.

Відомості про авторів (About authors)

Вербицький Євген Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри електронних пристроїв та систем, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Ievgen Verbytskyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., Department of Electronic Devices and Systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

Лук'янов Микола Олексійович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент кафедри електронних пристроїв та систем, Київ, Україна ; ORCID: 0000-0001-8930-9992; e-mail: zebrahead097@gmail.com.

Mykola Lukianov – Department of Electronic Devices and Systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8930-9992; e-mail: zebrahead097@gmail.com.

Бондаренко Юлія Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри електронних пристроїв та систем, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-1803-0684; e-mail: bondarenko.julie@gmail.com.

Iuliia Bondarenko – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., The department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1803-0684; e-mail: bondarenko.julie@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Вербицький Є. В., Лук'янов М. О., Бондаренко Ю. В. Принцип формування моменту зі зменшеною пульсацією у вентильно-індукторному двигуні з П-подібними полюсами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 3 (9). С. 3-10. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.01.

Please cite this article as:

Verbytskyi I., Lukianov M., Bondarenko I. Principle of torque formation with reduced pulsation in switched reluctance motor with U-shaped poles. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 3 (9), pp. 3–10, doi:10.20998/2413-4295.2021.03.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Вербицкий Е. В., Лукьянов М. А., Бондаренко Ю. В. Принцип формирования момента с уменьшенной пульсацией в вентильно-индукторном двигателе с П-подобными полюсами. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 3 (9). С. 3-10. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.01.

АННОТАЦІЯ В статті проаналізовані типи двигателів для транспортних засобів і виділен вентильно-індукторний тип двигателя, як той, що має просту конструкцію, високу надійність і низьку ціну. Приведені принципи роботи вентильно-індукторних двигателів (ВИД) і їх модифікації. Широке використання ВИД в транспортних засобах тормозит низьким удельним моментом і його великою пульсацією. Для збільшення удельного моменту пропонується спарену намотку обмоток на сусідні стержні П-образних полюсів статора. Показано принцип формування вращательної сили і пропонується оцінку ефективності використання електроенергії для її формування. В програмній середі COMSOL Multiphysics проаналізовані переваги і недоліки використання П-образних полюсів з трапецидальним і прямокутним профілем, і вибран останній тип полюса завдяки забезпеченню більшого моменту при однакових габаритах. Показано, що ширина стержневий полюса з прямокутним профілем для забезпечення максимального моменту повинна бути близько третини від ширини основи полюса. Приведена типовая форма тока обмотки полюса, що мінімізує пульсацію моменту. Обґрунтована цілісність проектування спеціалізованого електропривода для пропонуваної топології ВИД і синтез для нього закону управління, забезпечує потрібне значення моменту з мінімальною пульсацією. В результаті проведених досліджень були зроблені висновки про можливість удешевлення технології ВИД, при використанні модульної структури на основі П-образних полюсів со спареною намоткою обмоток на полюсах статора, при якій обмотки намотуються на стержні одразу двох сусідніх полюсів, що дозволяє компактно розміщати їх в околицях полюса без використання додаткового простору і відповідно забезпечує велику щільність розташування полюсів. Моделювання процесу формування моменту в полюсах двигателя в програмній середі COMSOL Multiphysics показало переваги використання полюсів з прямокутним профілем по порівнянню з полюсами трапецидального типу і підтвердило доцільність використання полюсів з шириною стержневий, що становить близько третини ширини основи полюса.

Ключевые слова: вентильно-індукторний двигатель; П-подібні полюса; мінімізація пульсації моменту; регульований електропривод

Надійшла (received) 30.08.2021