

Визначення впливу геометрії пазу статора тягового синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами на рівень зубчатого електромагнітного моменту

Б. Г. Любарський, Є. С. Рябов, Д. І. Якунін, О. М. Дубініна, О. Я. Ніконов, В. В. Доманський

На основі методу скінчених елементів розроблено модель магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами. Модель реалізована в середовищі скінчено-елементного аналізу FEMM з одночасним використанням скрипту на мові Lua. Модель дає можливість визначити залежність електромагнітного моменту двигуна від куту обертання ротору.

Визначення рівня зубчастого моменту важливо для оцінки його шкідливого впливу на елементи конструкції тягового двигуна та приводу в цілому.

За результатами цифрового моделювання отримані залежності електромагнітного моменту від кута повороту ротору. Момент має змінну складову – зубчастий момент, – амплітуда якої для відкритих пазів у режимі номінального навантаження складає 182 Нм, а для напіввідкритих пазів 90 Нм.

Застосування напіввідкритих пазів позитивно впливає на боротьбу з зубчастим моментом синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами та може бути рекомендовано до подальшого вживання на двигунах подібного типу. Напіввідкриті пази зменшує у 2 рази відкриття пазу статора та призводить до більш плавного розподілу потоку під зубчастим поділом. Це призводить зменшення коливань основного магнітного потоку. Запропоноване застосування напіввідкритих пазів статору дозволяє більше ніж у 2 рази знизити рівень зубчастого моменту синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами у номінальному режимі.

Визначено, що доволі позитивним фактором є збільшення на 4,8 % середнього значення моменту двигуна в номінальному режимі при застосуванні напіввідкритих пазів. Це обумовлюється зниженням середнього значення магнітного опору основному магнітному потоку. Тому з одночасним зменшенням коливання моменту перехід до напіввідкритих пазів дає можливість підняти масогабаритні показники двигуна в цілому.

Ключові слова: синхронно-реактивний двигун з постійними магнітами, зубчатий момент, метод скінчених елементів, паз статора.

1. Вступ

Застосування на рухомому складі залізниць, промислового та міського транспорту тягових електроприводів з асинхронними електродвигунами є на теперішній час загальносвітовою практикою [1–3]. Тягові асинхронні електроприводи в протязі останніх 15 років найбільш широко застосовуються на рухомому складі міського електротранспорту – тролейбусах виробництва «Solaris

Bus & Coach» S.A. (Польща), Škoda Transportation (Чехія), «Busscar Ônibus S.A.» (Бразилія), «Богдан» (Україна), «Елетронтранс» (Україна), «Еталон» (Україна), трамваях виробництва «Татра-Юг» (Україна) та «Електронтранс» (Україна) та інші, а також на рухомому складі, який модернізується комунальними підприємствами великих міст [4]. На рухомому складі залізниць асинхронний тяговий привод застосовано на електровозах виробництва «LORIC» (Кітай), «Alstom», «ADtranz», «Bombardier», «Siemens AG» (Європейський союз), ДС-3 виробництва ДЕВЗ (Україна), дизель-поїздах ДЕЛ-02 виробництва «Луганськтепловоз» (Україна), швидкісному електропоїзді ЕКр-1 виробництва ПАО «КВБЗ» (Україна), а також на рухомому складі іноземних виробників таких як HRCS2 виробництва Hyundai Rotem (Південня Корея) та EJ 675 Škoda Transportation (Чехія), який експлуатується Укрзалізницею. Головними перевагами тягового асинхронного електроприводу є високі енергетичні та масогабаритні показники, високий рівень надійності, простота конструкції, великі терміни між сервісного обслуговуванням [5]. Однак світові тенденції зменшення енерго- та ресурсоспоживання рухомим складом транспорту ставлять перед науково-технічною спільнотою задачі щодо подальшого удосконалення тягових електроприводів змінного струмів напрямку дослідження нових типів електро-механічних перетворювачів [3]. Таким альтернативним підходом є використання синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів [3], однак велика маса висококоерцитивних постійних магнітів значно збільшує затрати на виробництво таких електродвигунів. Необхідність підтримання широкого діапазону регулювання частоти обертання та моменту є особливою вимогою до тягових приводів. Тому підтримання на високому рівні енергетичних показників необхідно не тільки у номінальному режимі роботи а і в інших режимах роботи. За оцінками авторів роботи [6] такі характеристики можуть забезпечити синхронно-реактивні двигуни з постійними магнітами (СРДПМ) (permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor – PMSynRM, PMA-SynRel). Аналіз проведений в [7] показує, що масо-габаритні та вартісні показники двигуна такого типу порівняні з асинхронним найкращими. Привод на основі СРДПМ є «прямою альтернативою» асинхронному тяговому електроприводу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [8] розглянуто конструктивні схеми та принцип дії СРДПМ. В [9] зазначається, що у цьому двигуні, як правило, застосовують розподілену обмотку статора. Ротор двигуна в радіальному напрямку для підвищення реактивного обертаючого моменту поділено на канали потокових бар'єрів. Особливістю ротора є наявність постійних магнітів (рідкоземельні елементи типу NdFeB, феррит Y30), вставлені в його потокові бар'єри [10].

Показано, що статор двигуна виконується, як правило з жорстких секцій, що дає високу механічну порочність обмотки та її найкращі умови охолодження [6]. Відкриті пази статора двигуна в поєднанні активним явно полюсним ротором обумовлюють можливість виникнення зубчатих електромагнітних моментів, які розглянуто в роботі [11]. Повітряний зазор між статором та ротором СРДПМ відносно малий (1–2 мм). Його розмір обумовлений намаганням під-

вищення енергетичних показників двигуна. Однак залишилися невирішеними питання, пов'язані з тим, що зниження зазору призводить до росту зубчатого моменту двигуна. Негативний вплив зубчатих моментів на механічну ланку приводу розглянуто в роботі [11]. В [11] зазначається, що майже незначні за величиною моменти можуть призвести до значного впливу на механічну частину приводу. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з тим, що пази статора для таких обмоток, як правило, виконуються відкритими, що продиктовано технологією укладки жорстких секцій обмотки [6].

Зубчатий момент двигуна обумовлений нерівномірність розподілу магнітної індукції двигуна у повітряному зазорі в зв'язку з різною магнітною проникністю зубця та паза статора. Це доводиться за результатами розрахунків у роботах [6, 11], а також ступінчата форма розподілу магніторушійної сили обмотки статору [12].

Для зменшення зубчатого моменту можливо використання напіввідкритих пазів статору, які, з одного боку, зменшують нерівномірність розподілу індукції, а з іншого – нададуть можливості зберегти умови технології виконання обмотки статору. Саме такий підхід використаний у роботі [13], в якій розглянуто вплив відкриття пазу на електромагнітний момент. Автори цієї роботи зазначають значний вплив форми пазу на енергетичні показники двигуна. Проте розглянута в [13] відноситься до двигунів відносно малої потужності з всіпною обмоткою статору, для який можливо застосування закритих пазів. Вплив зубчатості статору для явнополусної обмотки статору розглянуто у роботі [14] та зазначається його значний вплив на характер електромагнітного моменту двигуна [15].

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого визначенню впливу форми паза статора на рівень зубчатого моменту тягового СРДПМ

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є визначення впливу геометрії пазу тягового СРДПМ на рівень та характер зміни зубчатого моменту.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити модель магнітного поля СРДПМ з відкритим та напіввідкритим пазом статору;
- визначити характер та величину зубчатого моменту тягового СРДПМ;
- провести порівняльний аналіз результатів визначення зубчатого моменту тягового СРДПМ для різних форм пазу.

4. Матеріали та методи дослідження

Для проведення досліджень було обрано тяговий СРДПМ для приводу коліс тролейбусу. Номінальний момент 900 Нм при фазному струмі 350 А. Основні характеристики якого було знайдено за методикою [6]. Параметри статора двигуна наведено у табл. 1.

Геометрію ротору обрано за методикою [6], а параметри постійного магніту для нього приведено у табл. 2.

Таблиця 1

Дані статора тягового СРДПМ для приводу коліс тролейбусу

Найменування	Значення
Кількість пазів	48
Кількість ефективних провідників у пазу	4
Кількість паралельних гілок	1
Кількість елементарних провідників у ефективному з'єднанні фаз – «зірка»	3 (по висоті)
Розрахунковий зовнішній діаметр статора, м	0,46
Діаметр розточки, м	0,3
Осьова довжина магнітопроводу, м	0,3
Порітряний зазор, м	0,0013
Розміри провідника обмотки статора (без ізоляції)	1,6×12,5
Висота пазу, м	0,040
Ширина пазу, м	0,0145

Таблиця 2

Параметри постійних магнітів

Найменування	Значення
Матеріал магнітів	Nd-Fe-B
Залишкова магнітна індукція	1,0 Тл
Коерцитивна сила по намагніченості	850 кА/м

Для проведення досліджень зубчатого моменту в роботі обрано метод скінчених елементів у двомірній плоско-паралельній постановці задачі. Цей метод дозволяє врахувати зубчатий характер статора двигуна та місцеві насичення елементів його конструкції [11, 16–19].

На рис. 1, 2 наведено область розрахунку що, розбито на кінцеві трикутні елементи для статора з відкритим та напіввідкритими пазами, яку реалізовано в середовищі FEMM [19].

Визначення електромагнітного моменту на валу СРДПМ знайдено з використанням постпроцесору FEMM [19] використовуючи стандартну функцію визначення моменту.

5. Результати дослідження зубчатих моментів синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами

5.1. Модель магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з відкритим та напіввідкритим пазом статора

Для визначення зубчатого моменту геометрія розрахункової області може змінюватися в залежності від положення ротора та значень струмів у обмотці статора.

Для розрахунку поля синтезована сітка скінчених елементів. Для розрахунку згідно рекомендаціям [18, 19] використовуються скінчені трикутні елементи першого порядку. Вибір саме такого типу елементів обґрунтовано у роботі

[18] для ротативних електричних машин. У повітряному зазорі обрано фіксований радіус окружності синтезу скінчених елементів, який дорівнює 0,0005 м та дозволяє створити не менш трьох шарів скінчених елементів у повітряному зазорі. У інших елементах розрахункової області синтез сітки проводиться адаптивно розрахунковій геометрії. Скінчено-елементну сітку зображено на рис. 1, 2.

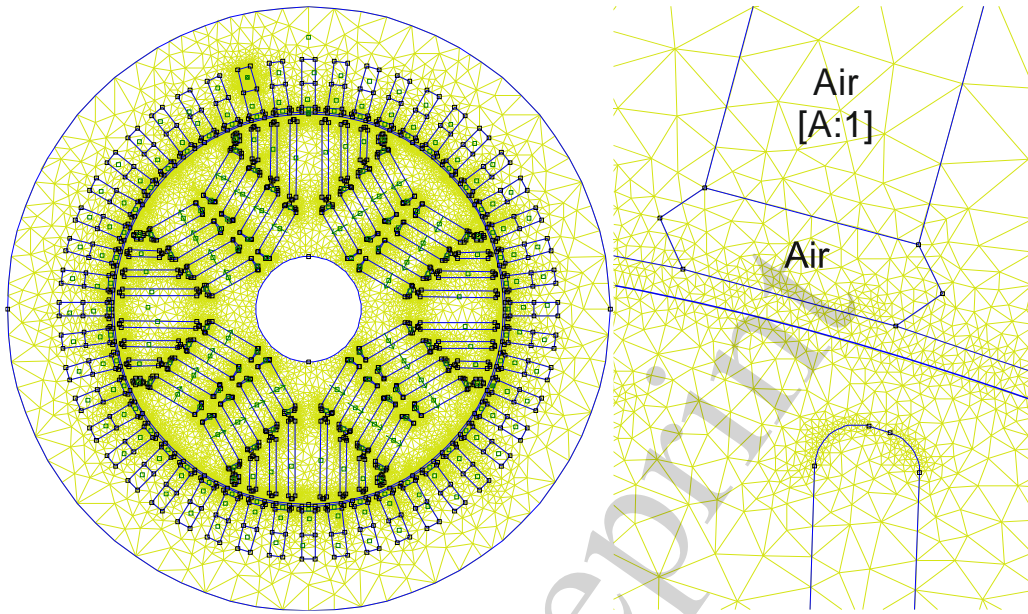


Рис. 1. Скінчено-елементна сітка синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з відкритими пазами

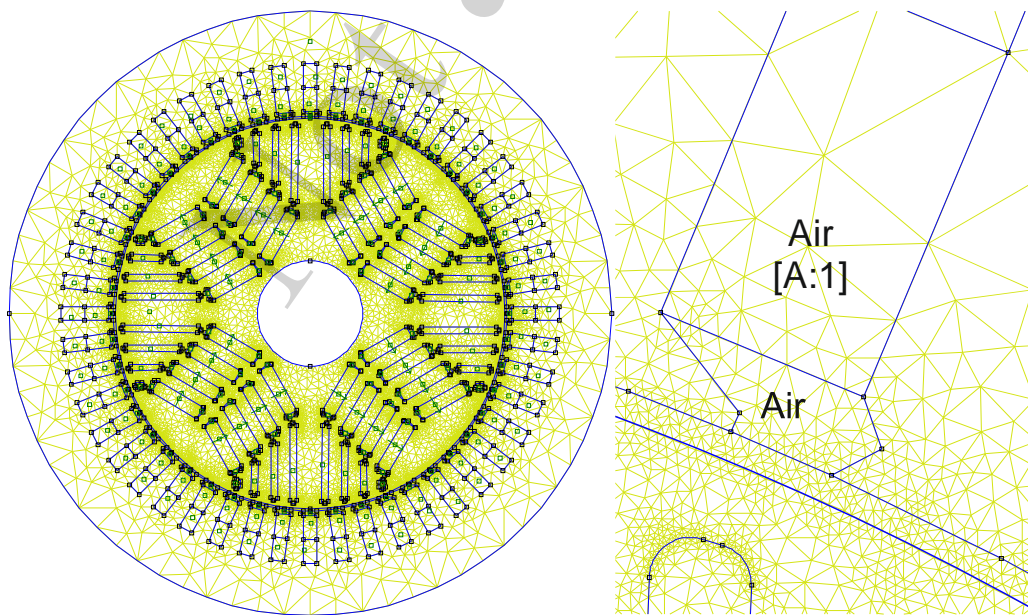


Рис. 2. Скінчено-елементна сітка синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з напіввідкритими пазами

Для проведення цифрових експериментів створено макрос на мові Lua [19], що дозволяє автоматично змінювати кут повороту ротора та встановлює параметри струмів статора, які відповідають номінальному куту навантаження двигуна.

Достовірність проведених досліджень обумовлюється адекватністю використаних програмних пакетів скінчено-елементного аналізу магнітного поля та визначенню значень електромагнітного моменту, які доведено в роботах [16–19].

5. 2. Визначання зубчатого моменту тягового синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами

Тягові СРДПМ характеризуються як режимами тяги та електричного гальмування, так і режимом вибігу, в якому струм в обмотці статора дорівнює нулю. Однак в режимі вибігу частково зберігається основний магнітний потік, обумовлений дією постійних магнітів. Таким чином, у тяговому СРДПМ зберігається можливість виникнення зубчатого моменту в режимі вибігу, що особливо шкідливо при високих швидкостях руху (частоти обертання двигуна) транспортного засобу.

Таким чином, в роботі проводиться дослідження зубчатого моменту для номінального режиму так і для режиму вибігу.

Результати розрахунку магнітного поля в номінальному режимі та в режимі вибігу наведено на рис. 3, 4 для статора з відкритими пазами та рис. 5, 6 для напіввідкритих пазів.

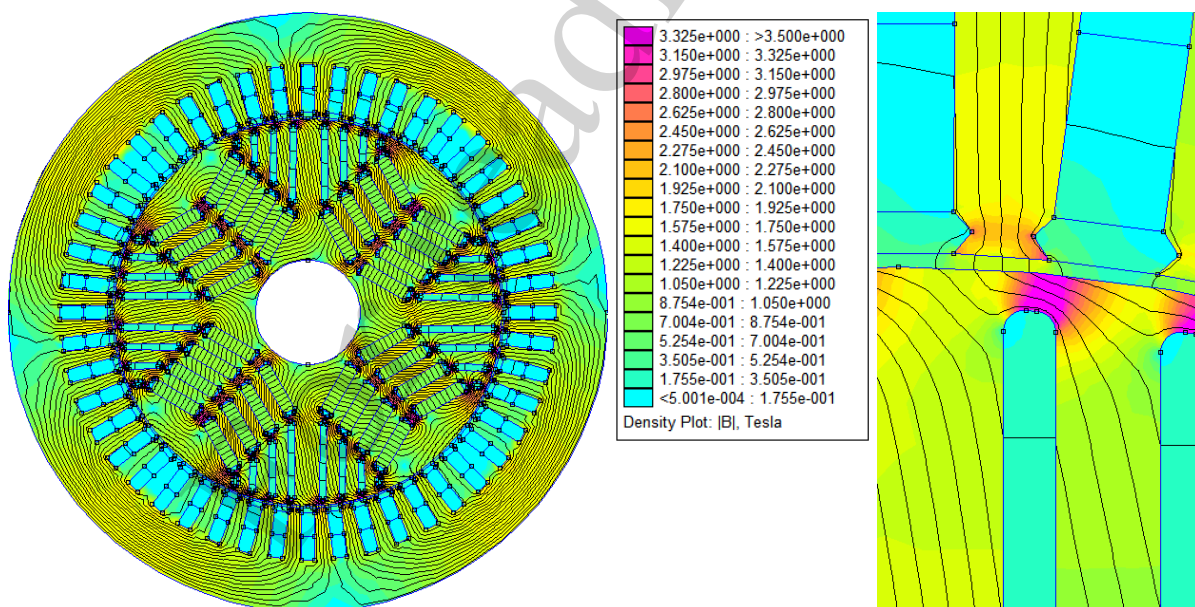


Рис. 3. Результати розрахунку магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з відкритими пазами в номінальному режимі

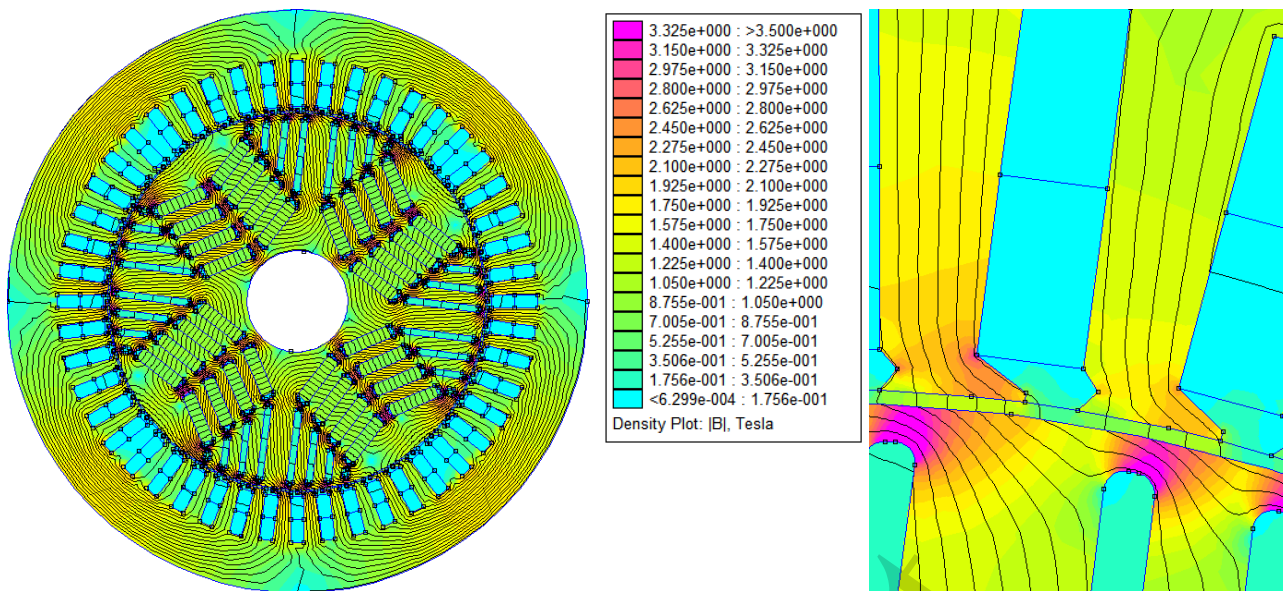


Рис. 4. Результати розрахунку магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з напіввідкритими пазами в номінальному режимі

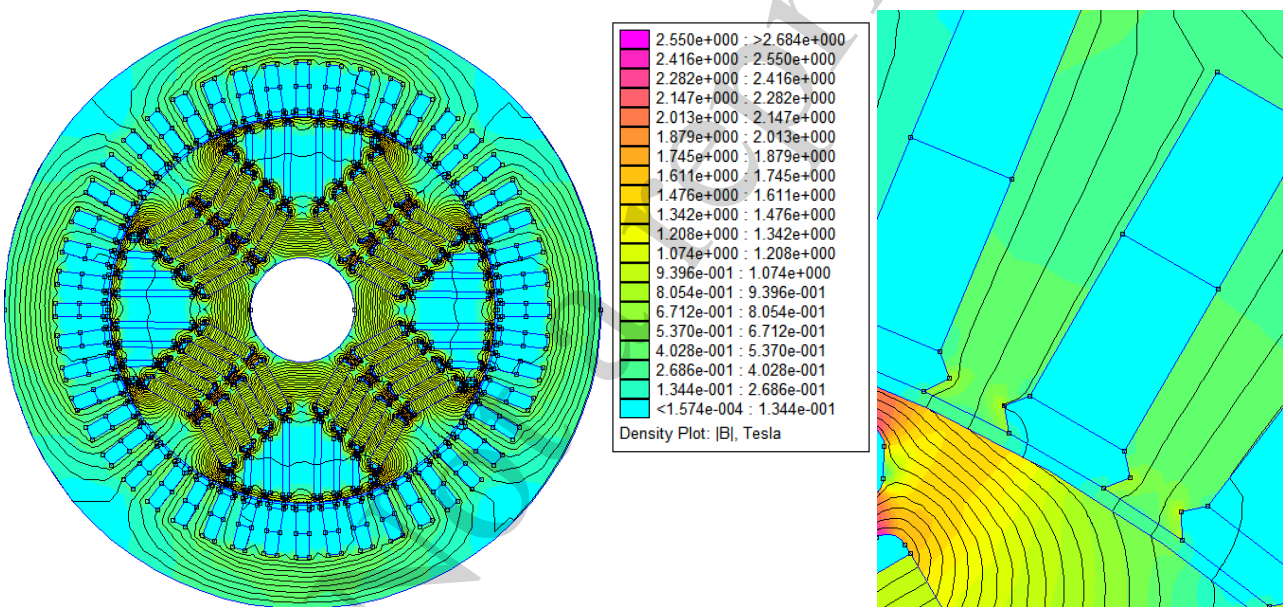


Рис. 5. Результати розрахунку магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з відкритими пазами в режимі вибігу

Визначення електромагнітного моменту проводиться за допомогою скрипту, написаного на мові Lua для постпроцесору програми FEMM [19]. Використовуючи команди «groupselectblock», який дозволяє одночасно позначити усі розрахункові області ротору СРДПМ, позначається елемент двигуна, що обертається. На наступному етапі за допомогою команди «blockintegral(23)» визначається момент на основі методики [18].

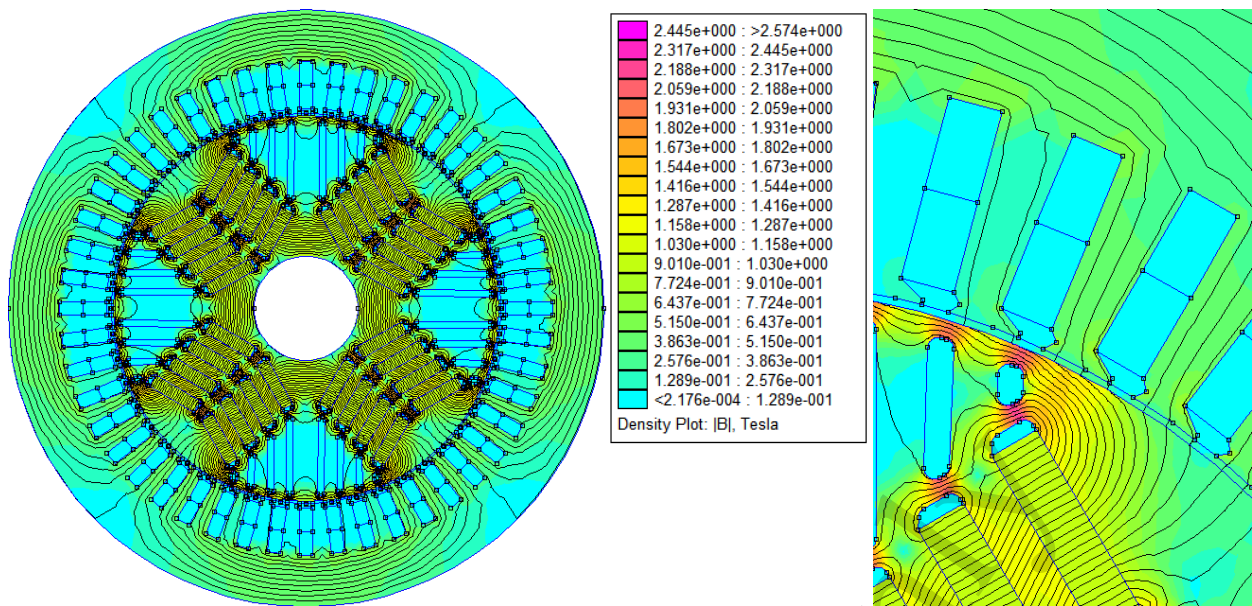


Рис. 6. Результати розрахунку магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з напіввідкритими пазами в режимі вибігу

5.3. Порівняльний аналіз зубчатого моменту тягового синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами для різних форм пазу

За результатами комплексу цифрових експериментів встановлено залежність зубчатого моменту СРДПМ від кута повороту ротору для одного зубчатого ділення. Залежність наведено на рис. 7, для номінального режиму та рис. 8 для режиму вибігу.

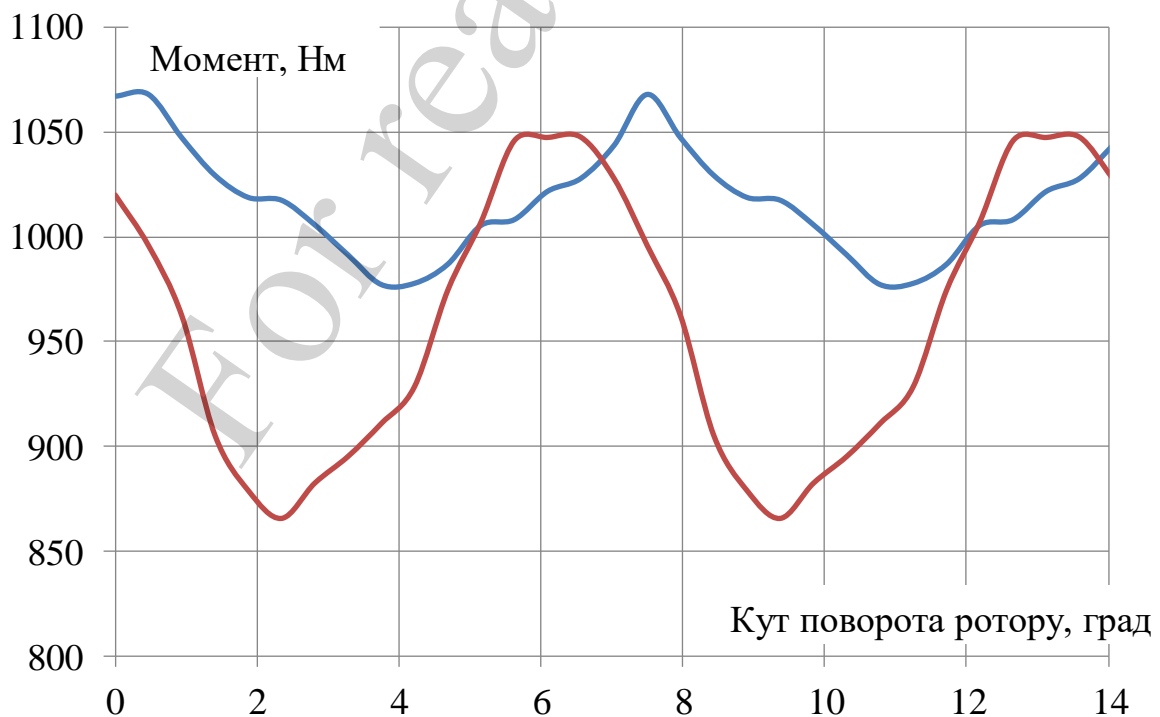


Рис. 7. Результати електромагнітного моменту синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з напіввідкритими пазами в номінальному режимі

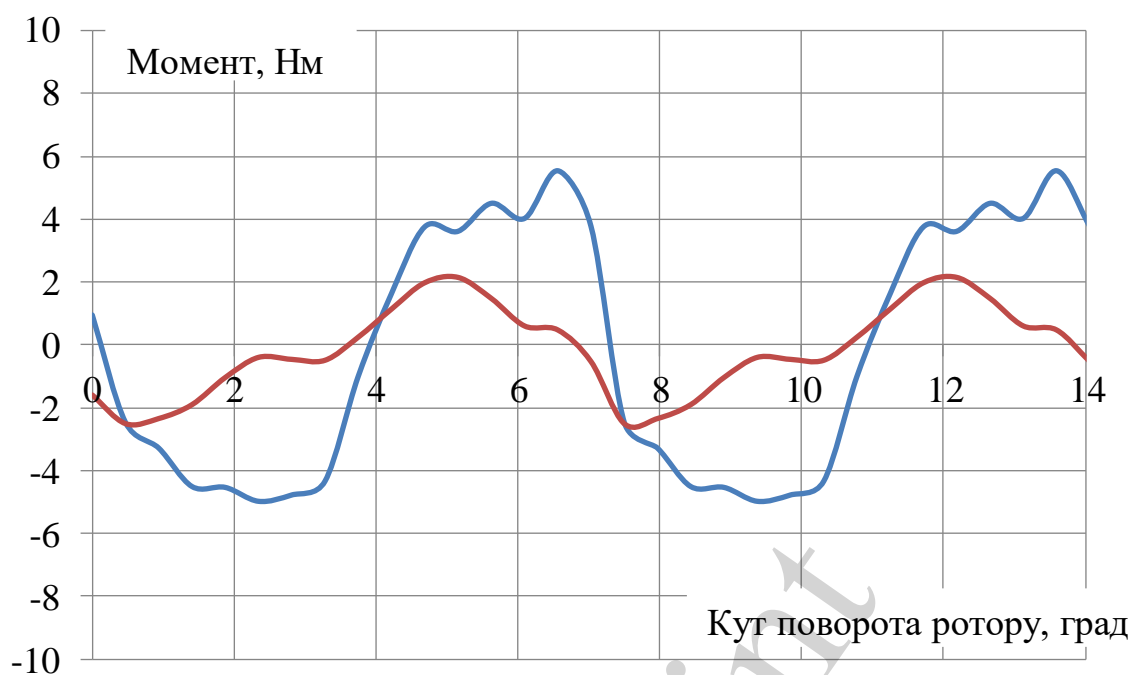


Рис. 8. Результати електромагнітного моменту синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами з напіввідкритими пазами в режимі вибігу

Як видно з графіків залежності (рис. 7, 8) електромагнітного моменту від кута повороту ротору, момент має змінну складову – зубчастий момент, – амплітуда якої, для відкритих пазів у режимі номінального навантаження, складає 182 Нм, а для напіввідкритих пазів 90 Нм. В режимі вибігу амплітуда змінного моменту складає для відкритих пазів 5,52 Нм для напіввідкритих пазів – 10,53 Нм.

6. Обговорення результатів дослідження рівня зубчастого електромагнітного моменту синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами

З картини магнітного поля СРДПМ рис. 3, 4 видно, що основний магнітний потік двигуна проходить в більшості через зубець статора. Цей процес характерний для більшості електричних машин. Однак попадаючи в ротор значна його частина проходить крізь магнітні шунти ротору (сталеві перетинки), які мають значне насичення. При обертанні ротору напрям т потоку та його рівень змінюється в зв'язку з проходженням магнітних шунтів під пазом чи зубцем статора. Цей процес пов'язано зі значною зміною магнітного опору основному магнітному потоку. Одночасно на збільшення рівня зміни потоку впливає дуже малий, відносно інших типів синхронії електричних машин, повітряний зазор. Його низький рівень (майже у 8–10 разів нижчий ніж у звичайних синхронних двигунів) обумовлює високі енергетичні характеристики СРДПМ, з одного боку. А з іншого, призводить до збільшення рівня зубчастого моменту, причиною виявлення якого є зміна опору основного магнітного потоку, в якому велику частку починає відігравати потік, що проходить саме крізь зубець статора.

Використання напіввідкритих пазів зменшує у 2 рази відкриття пазу статора та призводить до більш плавного розподілу потоку під зубчастим поділом. Таке

технічне рішення призводить зменшення коливань основного магнітного потоку. Запропоноване застосування напіввідкритих пазів статора дозволяє більше ніж у 2 рази знизити рівень зубчастого моменту СРДПМ у номінальному режимі.

Режим вибігу двигуна (рис. 5, 6) характеризується значною зміною картини магнітного поля. СРДПМ по принципу дії в першу чергу є реактивною електричною машиною. Для неї характерно відповідність основного магнітного потоку статора. Постійний магніт в СРДПМ відіграє допоміжну функцію. Тому потік в режимі вибігу значно зменшується, що призводить до значного (в 9–17 разів) зменшення зубчастого моменту (рис. 7, 8). Напрямок основного магнітного потоку змінюється, що призводить до збільшення зубчастого моменту при застосуванні напіввідкритих пазів відносно відкритих (рис. 8). Однак рівень зубчастого моменту в режимі вибігу значно менший, за режим тяги. Тому застосування напіввідкритих пазів позитивно впливає на боротьбу з зубчастим моментом СРДПМ та може бути рекомендовано до подальшого вживання на двигунах подібного типу.

Слід зазначити, що доволі позитивним фактором є збільшення на 4,8 % середнього значення моменту двигуна в номінальному режимі при застосуванні напіввідкритих пазів. Це обумовлюється зниженням середнього значення магнітного опору основному магнітному потоку. Тому з одночасним зменшенням коливання моменту перехід до напіввідкритих пазів дає можливість підняти масогабаритні показники двигуна, в цілому.

Результати проведеного дослідження можуть бути корисними при розробці синхронних електричних машин та приводів на їх основі з достатньо малим значенням повітряного зазору. К таким типам відносяться синхронні двигуни зі збудженням від постійних магнітів, синхронні реактивні (вентильні) двигуни, а також генератори таких типів.

Подальшим розвитком проведених досліджень може бути використання результатів розрахунку магнітного поля для оцінки рівня поверхневих втрат в двигуні. Причиною цих втрат є коливання магнітного потоку в зв'язку зі зубчастою структурою статора.

7. Висновки

1. На основі методу скінчених елементів розроблено модель магнітного поля СРДПМ. Модель реалізована в середовищі скінчено-елементного аналізу FEMM з одночасним використанням скрипту на мові Lua. Модель дає можливість визначати залежність електромагнітного моменту двигуна від кута обертання ротору.

2. За результатами цифрового моделювання отримані залежності електромагнітного моменту від кута повороту ротору. Момент має змінну складову – зубчастий момент, – амплітуда якої, для відкритих пазів у режимі номінального навантаження, складає 182 Нм, а для напіввідкритих пазів 90 Нм. В режимі вибігу амплітуда змінного моменту складає для відкритих пазів 5,52 Нм для напіввідкритих пазів – 10,53 Нм.

3. Проведений порівняльний аналіз застосування відкритих та напіввідкритих пазів статора для СРДПМ показав доцільність використання останніх для

тягових двигунів такого типу. Показано, що застосування напіввідкритих пазів дає можливість не тільки значно, більш ніж у 2 рази, знизити зубчастий момент, але і на 4,8 % збільшити середній електромагнітний момент двигуна у номінальному режимі.

Література

1. Лувишис, А. Л. (2017). Асинхронный привод: начало пути. Локомотив, 1 (721), 44–46.
2. Лувишис, А. Л. (2018). Новые локомотивы железных дорог США. Железнодорожный транспорт, 8, 70–77.
3. Liubarskyi, B., Demydov, A., Yeritsyan, B., Nuriiev, R., Iakunin, D. (2018). Determining electrical losses of the traction drive of electric train based on a synchronous motor with excitation from permanent magnets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (92)), 29–39. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127936>
4. Басов, Г. Г., Яцько, С. І. (2005). Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 2. Харків: «Апекс+», 248.
5. Безрученко, В. М., Варченко, В. К., Чумак, В. В. (2003). Тягові електричні машини електрорухомого складу. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 252.
6. Liubarskyi, B. G., Overianova, L. V., Riabov, I. S., Iakunin, D. I., Ostroverkh, O. O., Voronin, Y. V. (2021). Estimation of the main dimensions of the traction permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2, 3–8. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.2.01>
7. Stipetic, S., Zarko, D., Kovacic, M. (2016). Optimised design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor series using combined analytical–finite element analysis based approach. *IET Electric Power Applications*, 10 (5), 330–338. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0245>
8. Viego-Felipe, P. R., Gómez-Sarduy, J. R., Sousa-Santos, V., Quispe-Oqueña, E. C. (2018). Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por iman permanente: Un nuevo avance en el desarrollo de los motores eléctricos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 19 (3), 269–279. doi: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n3.023>
9. Moghaddam, R.-R. (2011). Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications. Theoretical and Experimental Reevaluation. Stockholm, 260. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:417890/FULLTEXT01.pdf>
10. Wu, W., Zhu, X., Quan, L., Du, Y., Xiang, Z., Zhu, X. (2018). Design and Analysis of a Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Considering Magnetic Saliency and PM Usage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28 (3), 1–6. doi: <https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2775584>
11. Uspensky, B., Avramov, K., Liubarskyi, B., Andrieiev, Y., Nikonov, O. (2019). Nonlinear torsional vibrations of electromechanical coupling of diesel engine gear system and electric generator. *Journal of Sound and Vibration*, 460, 114877. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114877>

12. Mohd Jamil, M. L., Zolkapli, Z. Z., Jidin, A., Raja Othman, R. N. F., Sutikno, T. (2015). Electromagnetic Performance due to Tooth-tip Design in Fractional-slot PM Brushless Machines. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 6 (4), 860. doi: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v6.i4.pp860-868>
13. Viego, P. R., Gómez, J. R., Sousa, V., Yanes, J. P. M., Quispe, E. C. (2021). Reducing torque pulsations in PMA-SynRM: a way for improving motor performance. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 12 (1), 67. doi: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i1.pp67-79>
14. Kolehmainen, J. (2010). Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25 (2), 450–456. doi: <https://doi.org/10.1109/tec.2009.2038579>
15. Wang, A., Li, D. (2020). Influence of unequal stator tooth width on the performance of outer-rotor permanent magnet machines. *Open Physics*, 18 (1), 432–438. doi: <https://doi.org/10.1515/phys-2020-0175>
16. Kostenko, I. (2018). Improvement of the method of calculation of mechanical characteristics of a traction motor of direct current with combined excitation. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (1 (42)), 4–10. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141384>
17. Sezen, S., Karakas, E., Yilmaz, K., Ayaz, M. (2016). Finite element modeling and control of a high-power SRM for hybrid electric vehicle. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 62, 49–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.01.006>
18. Сильвестер, П., Феррари, П. (1986). Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. М.: Мир, 232.
19. Meeker, D. (2015). *Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual*. URL: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>