

УДК 629.429.3:621.313

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247208

Методика вибору оптимальних геометричних параметрів ротору тягового синхронно-реактивного двигуна з постійними несекціонованими магнітами

Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін, О. Я. Ніконов, Д. Б. Любарський,
В. О. Васенко, М. І. Гасанов

Розроблена математична модель по визначенню електромагнітного моменту синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами. Вона базується на розрахунку магнітного поля двигуна методом скінчених елементів у плоско-паралельній постановці задачі. Модель реалізована в середовищі скінчено-елементного аналізу FEMM. Модель дає можливість визначати електромагнітний момент двигуна при різноманітній геометрії ротору. Проведено постановку задачі умовної оптимізації ротору синхронно-реактивного двигуна за геометричними критеріями ротору. В якості задачі аналізу запропоновано використати математичну модель магнітного поля двигуна. Встановлено обмеження за геометричними та міцностними показниками. У якості метода оптимізації обрано метод Нелдера-Міда. Запропоновано синтез геометричних параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами на підставі вирішення задачі умовної оптимізації. Визначені обмеження, які накладаються на параметри оптимізації. За результатами досліджень ідентифіковано залежність обмеження куту повороту магніту на підставі розрахунків на міцність. За результатами розрахунків на підставі запропонованої методики визначено, що оптимальна відстань від міжполюсної осі та кут повороту магнітів знаходиться на обмеженні, що встановлено за міцністю конструкції ротора.

За результатами розрахунків значення цільової функції зменшилося на 24,4 % (з -847 Нм до -1054 Нм), що дає можливість значно підвищити електромагнітний момент лише за допомогою оптимального розташування магнітів на роторі двигуна.

За результатами вирішення задачі синтезу параметрів ротору тягового двигуна тролейбусу визначено оптимальні геометричні параметри розташування постійних магнітів.

Ключові слова: синхронно-реактивний двигун, метод Нелдера-Міда, метод скінчених елементів, несекціоновані постійні магніти.

1. Вступ

Використання на колісному рухомому складі магістрального, міського та промислового транспорту тягових електроприводів з електродвигунами змінного струму є на теперішній час загальносвітовою практикою [1–3]. Найбільш поширенні асинхронні електроприводи, які протягом останніх двох десятиріч знайшли масове застосування на тролейбусах виробництва Євросоюзу: «Solaris Bus & Coach» S.A. (Польща), Škoda Transportation (Чехія). Також на тролейбус-

них виробників інших країн: «Busscar Ônibus S.A.» (Бразилія), «Богдан» (Україна), «Елетронтранс» (Україна), «Еталон» (Україна). А також трамваях виробництва «Татра-Юг» (Україна) та «Електронтранс» (Україна) та інші [4]. На залізницях асинхронний тяговий привод також найбільш поширений на рухомому складі. Так, наприклад, на електровозах виробництва «LORIC» (Китай), «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). Широко розповсюджені вони також на рухомому складі іноземних виробників, таких як НRCS2 виробництва Hyundai Rotem (Південна Корея) та EJ 675 Škoda Transportation (Чехія), який експлуатується Укрзалізницею. До переваг тягового приводу на основі асинхронних двигунів відносять високі енергетичні та масо-габаритні показники, простоту конструкції та підвищену надійність, а також великий міжсервісний інтервал [5]. В напрямку світових тенденцій енергозбереження альтернативним підходом є використання синхронних тягових двигунів [6]. Встановлення у ротор двигуна постійних магнітів надало можливість повністю позбавитися контактного апарату, однак велика маса висококоерцитивних постійних магнітів значно збільшує витрати на виробництво таких електродвигунів [6]. Для виконання вимог дотримання широкого діапазону регулювання частоти обертання та моменту високі енергетичні показники необхідні не тільки у номінальному режимі, а і при малих та максимальних швидкостях обертання. Як зазначено у роботі [7], такі характеристики можуть забезпечити синхронно-реактивні двигуни з постійними магнітами (permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor – PMSynRM, PMA-SynRel). Аналіз, проведений в [8], показує, що масо-габаритні та вартісні показники двигуна такого типу співставні з найкращими асинхронними. Таким чином, привод на основі синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами є прямим конкурентом асинхронному тяговому електроприводу. Тому дослідження, які направлені на підвищення масогабаритних та енергетичних показників синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами, є актуальними.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [9] розглянуто конструкції та принцип дії синхронно-реактивні двигуни з постійними магнітами з різноманітними роторами двигуна. В [Ошибка! Источник ссылки не найден.] зазначається, що у цьому двигуні зазвичай статор синхронно-реактивні двигуни з постійними магнітами подібний за конструкцією до статора асинхронного двигуна. Усупереч цьому, конструкції ротору вельми відмінні. Ротор синхронного двигуна в радіальному напрямку для підвищення реактивного обертаючого моменту поділено на канали поточкових бар'єрів. Особливістю ротора є наявність постійних магнітів (рідкоземельні елементи типу NdFeB, ферит Y30), вставлені в його потокові бар'єри [11] які шикуються в лінію, близьку до напрямку потоку реакції якоря. Кількість ліній бар'єрів (отворів в осерді ротору) може бути від однієї, які розташовано перпендикулярно вісі q двигуна, як це зазначено в роботі [12], та повздовж вісі d , що наведено у роботі [13], до п'яти, які розташовано під кутом k вісі q , що наведе-

но у роботі [14]. Перший тип конструкції ротору належить до типу з несекціонованими магнітами, інші – секціановані.

Магніти, що встановлено на роторі, рівномірно намагнічені в напрямі вісі q , власне її й утворюючи. Постійні магніти мають приблизно таку ж проникність, що і повітря. Тому лінія бар'єрів (секцій) створює напрям з високим опором і магнітною анізотропією в напрямку вісі q . Залізо ротору має невеличкі сегменти, які необхідні для створення цілісної конструкції ротору [7]. Залізо ротору у сегментах має велике насичення потоками розсіювання ротору, тому магнітна проникність їх значно зменшена. Розмір сегментів обирається мінімальним. Він обумовлений міцностними показниками ротору [7]. Для вісі d , опір магнітному потоку значно зменшений завдяки тому що він проходить повздовж постійних магнітів за сталевими ділянками з малим насиченням. Як зазначається в роботі [6] з точки зору створення обертаючого моменту, розсіювання потоку, викликане тангенціальними ребрами, має бути мінімальним.

За результатами аналізу в роботі [11] зазначається, що визначення розмірів та параметрів електродвигунів можливо здійснювати шляхом чисельно-польових розрахунків у поєднанні з багатокритеріальною оптимізацією, як це зазначається в роботі [15]. Розглянута в роботі [7] методика проектування надає можливість визначити лише основні параметри статора двигуна, товщину та ширину постійних магнітів. Але їх розташування в роторі, від якого залежить робочі властивості двигуна? можливо визначити лише на підставі скінчено елементного аналізу магнітного поля двигунів [16, 17]. Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого визначенню оптимальної геометрії ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними несекціонованими магнітами.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є створення методики по визначенню оптимальних геометричних параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними несекціонованими магнітами, що надасть можливість підвищити електромагнітний момент двигуна при заданих розмірах статора.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити математичну модель магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними несекціонованими магнітами;
- провести постановку задачі оптимізації параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними несекціонованими магнітами для приводу коліс тролейбуса;
- вирішити задачу умовної оптимізації геометричних параметрів ротору двигуна та провести аналіз результатів синтезу ротору.

4. Матеріали та методи дослідження

На підставі проведеного попереднього аналізу досліджень в основу методики запропоновано покласти метод оптимального проектування [18, 19] на основі вирішення задачі умовної оптимізації геометричних параметрів ротора двигуна. Для вирішення задачі аналізу запропоновано застосувати метод скін-

чених елементів для розрахунку магнітного поля з подальшим визначенням рівня електромагнітного моменту двигуна. Аналогічний підхід було застосовано до оптимізації параметрів асинхронних двигунів в роботі [20]. Адекватність отриманих результатів підтверджувалась використанням апробованих програмних комплексів моделювання магнітного поля FEMM (США) [16, 17] та пакетів optlab (Україна) [18, 19, 21].

5. Результати дослідження геометричних параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними несекціанованими магнітами

5.1. Математична модель магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними несекціанованими магнітами

Основні положення проектування синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами викладено в роботі [7]. Ця методика дозволяє визначити товщину та приблизні габарити постійних магнітів. Проте взаємне їх розташування в роторі може значно вплинути на рівень електромагнітного моменту двигуна. Напрямом дослідження є визначення найбільш ефективного за критерієм рівня електромагнітного моменту розташування постійних магнітів у роторі двигуна. Тому основним критерієм ефективності ротору є рівень електромагнітного моменту. В роботі розглядається постановка задачі аналізу для ротору з несекціанованими постійними магнітами. Конструкція такого типу є одним з рішень, прийнятних для синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами. Для прикладу розглянуто вибір геометрії ротора двигуна для приводу коліс тролейбуса. Відповідно до попередніх розрахунків за методикою [7] було визначено розрахункові данні двигуна, що їх наведено у табл. 1. Розрахункові данні постійного магніту та його матеріалу наведено у табл. 2.

Таблиця 1

Розрахункові данні тягового двигуна тролейбусу

Найменування	Значення
Потужність двигуна, кВт	180
Максимальний електромагнітний момент, Нм	970
Струм якоря при максимальному моменті, А	350
Кількість пазів	48
Кількість ефективних провідників у пазі	6
Кількість паралельних гілок	1
Коефіцієнт скорочення кроку	0,778
Кількість елементарних провідників у ефективному	3 (по висоті)
Розрахунковий зовнішній діаметр статора, м	0,46
Діаметр розточки, м	0,3
Осьова довжина магнітопроводу, м	0,25
Односторонній повітряний проміжок, м	0,002
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
Кількість магнітів на полюс	2
Товщина магніту, м	0,03
Ширина магніту, м	0,045
Матеріал магнітів	Nd-Fe-B
Залишкова магнітна індукція, Тл	1,0
Коерцитивна сила по намагніченості, А/м	850 000

В якості базової геометрії двигуна обрано конструкцію з несекціонованими постійними магнітами, які знаходяться в різні пакути ротора. Ця конструкція є однією з конкурентних конструкцій двигуна. Однак їй притаманна низка переваг, таких як більша технологічність та менші механічні навантаження в елементах конструкції ротору. Базова геометрія наведена на рис. 1.

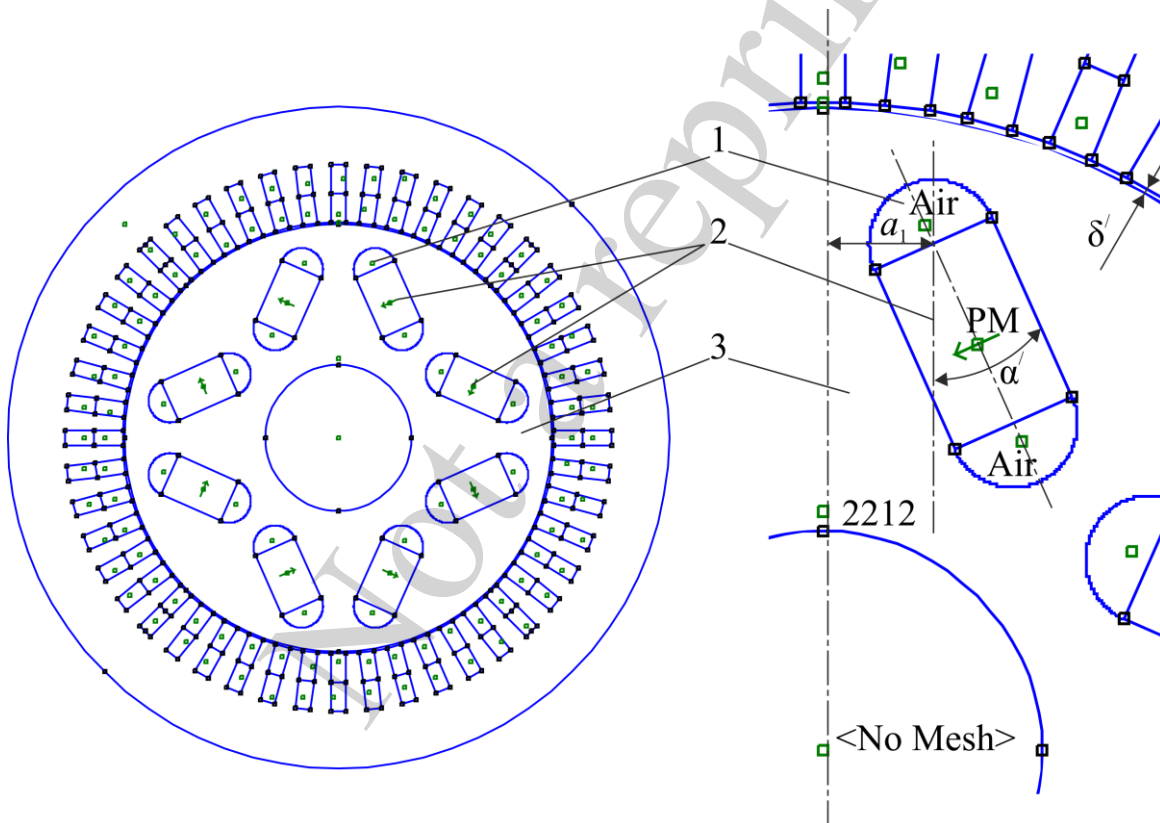


Рис. 1. Базова геометрія синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами: 1 – вирізи в осерді ротору під постійні магніти; 2 – постійні магніти; 3 – осердя ротору

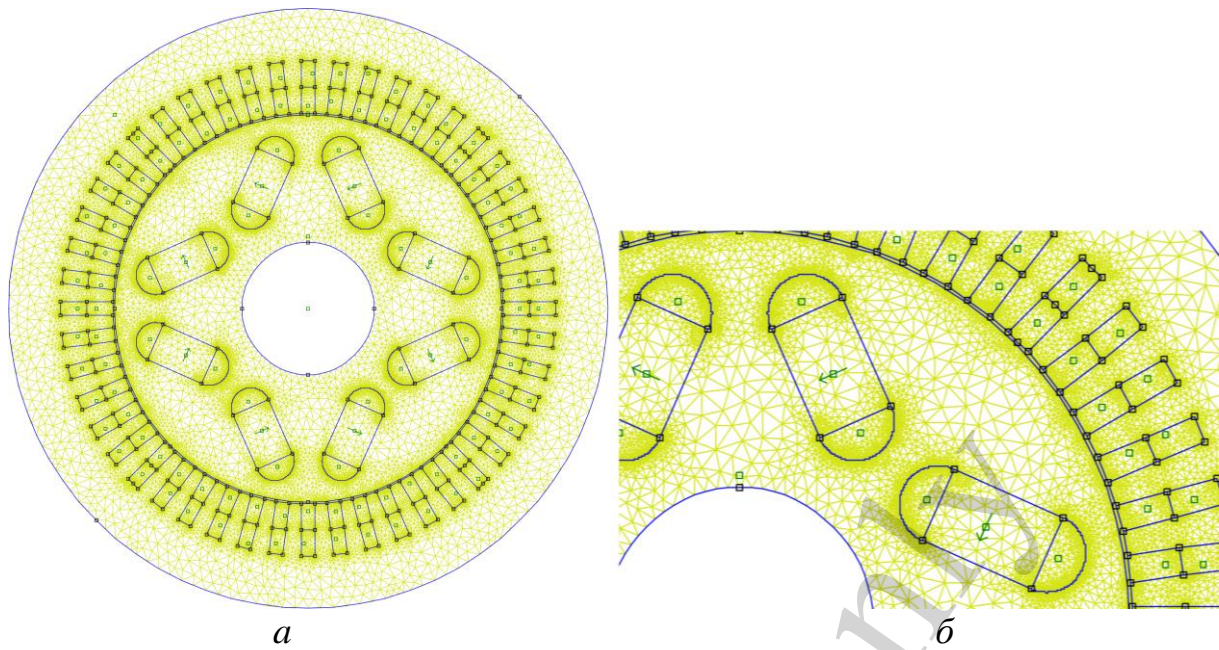


Рис. 2. Скінчено-елементна сітка синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами: *a* – загальний вигляд; *б* – зона постійних магнітів

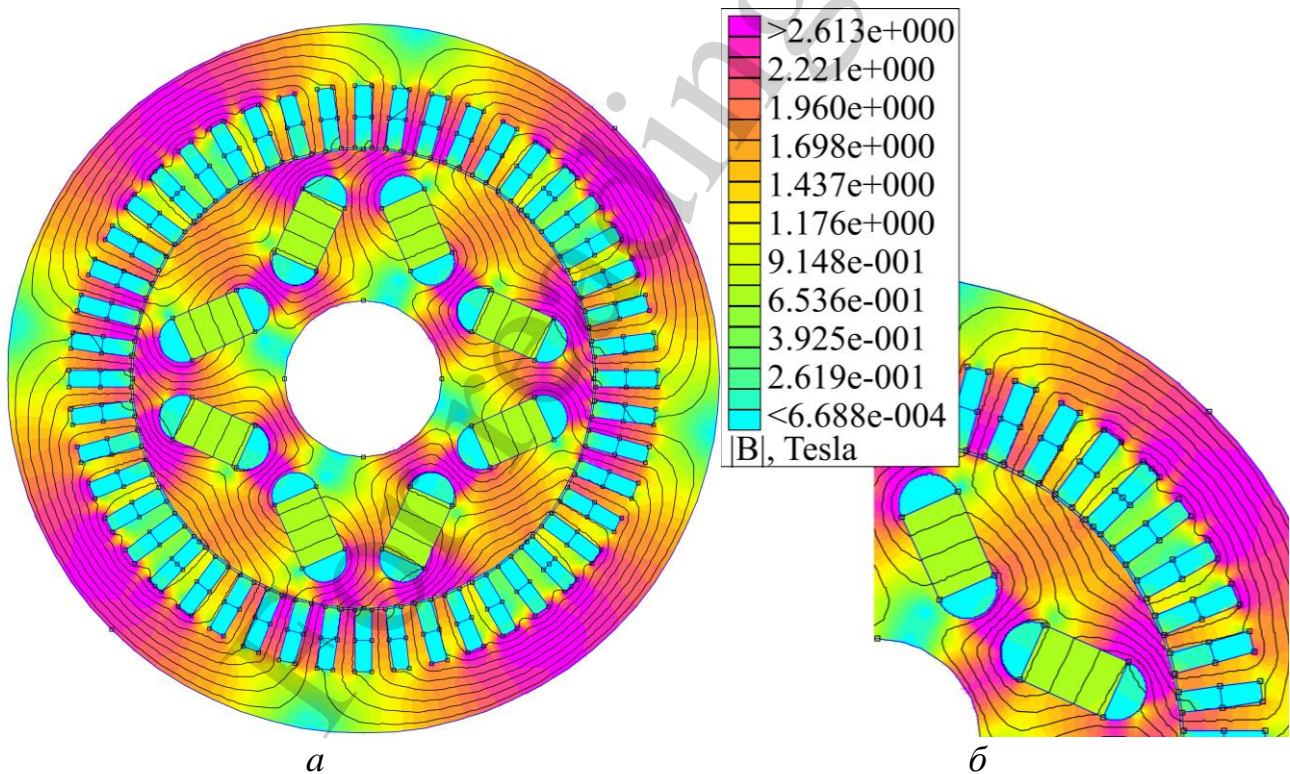


Рис. 3. Результати розрахунку магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами в номінальному режимі : *a* – загальний вигляд; *б* – зона постійних магнітів.

Для визначення електромагнітного моменту двигуна запропоновано використати метод скінчених елементів при плоско-паралельній постановці задачі.

Цей метод дозволяє врахувати розподіл магнітного потоку в роторі, насичення його частин в залежності від розташування магнітів. Для вирішення задачі використано комплекс скінчено-елементного моделювання FEMM [6, 16, 21]. Згідно методу, розрахункова область поділена на трикутні скінчені елементи. Густина сітки адаптивна, що дає можливість більш детально визначити геометрію ротору та повітряного зазору (рис. 2). Величина струмів якоря та положення ротору відповідають номінальному режиму роботи двигуна. Картину магнітного поля двигуна за результатами розрахунку наведено на рис. 3. За результатами розрахунку магнітного поля визначається електромагнітний момент двигуна за допомогою стандартних функцій FEMM [16].

5.2. Постановка задачі оптимізації параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна для приводу коліс тролейбуса

Передумовою оптимізації геометрії ротору двигуна з несекціанованими постійними магнітами є чітке визначення його параметрів. Ці параметри мають однозначно описувати геометричне положення вирізу в роторі та магніту у ньому.

В якості параметрів для вирішення задачі оптимізації запропоновано обрати розмір a_1 , який є відстанню магніту від міжполюсної вісі та кут нахилу α магніту відносно неї. Також до параметрів слід додати повітряний зазор двигуна – δ (рис. 1), який визначає основний магнітний опір, а також зміну кута (θ) навантаження відносно базової конструкції в електричних градусах. Базовий кут навантаження для конструкції обрано в 135° ел. Система керування тягового приводу забезпечує підтримання кута навантаження в режимі розгону рухомого складу та зменшує кут навантаження в режимі максимальної швидкості руху [5, 7, 9]. Тому визначення значення кута навантаження який відповідає максимальному значенню електромагнітного моменту необхідно для визначення параметрів системи керування двигуном.

На параметри оптимізації накладено обмеження, які можливо поділити два типи:

1) Обмеження за міцністю ротора.

На взаємне розташування вирізів в осерді ротору накладаються обмеження механічної міцності конструкції двигуна. За допомогою методики, наведеної в [7], визначена залежність максимального кута нахилу магніту від розміру a_1 . Залежність наведено на рис. 4 та апроксимовано сплайн-функцією третього порядку.

2) Обмеження, які накладаються на параметри задачі оптимізації за геометричними умовами. На геометричні розміри елементів конструкції, які є параметрами задачі оптимізації, накладаються обмеження, що обумовленні технологією виготовлення:

$$0,01 \text{ м} < a_1 < 0,035 \text{ м};$$

$$0 < \alpha < 80; \tag{1}$$

$$0,001 \text{ м} < \delta < 0,0025 \text{ м}.$$

$-45^\circ \text{ ел.} < \theta < 45^\circ \text{ ел.}$

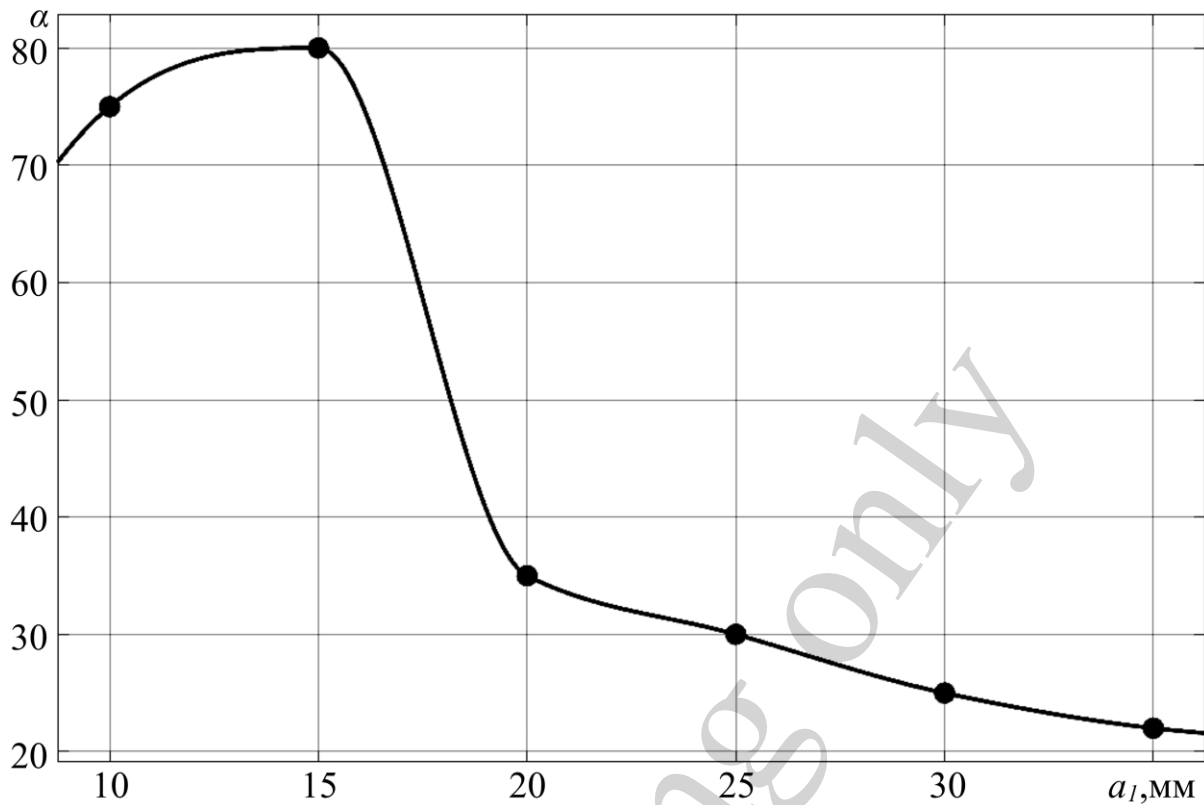


Рис. 4. Залежність обмеження куту повороту магніту від розміру a_1

Параметри оптимізації мають досить різний порядок визначення. Тому для застосування єдиного кроку методу оптимізації за усіма параметрами доцільно перейти до відносних одиниць при визначенні параметрів. Таким чином параметри задачі у відносних одиницях визначаються виразами:

$$x_1 = (a_1 - 0,01) / 0,025;$$

$$x_2 = \alpha / 80; \tag{2}$$

$$x_3 = (\delta - 0,001) / 0,0015;$$

$$x_4 = (\theta + 45) / 90.$$

Для підвищення ефективності роботи тягового двигуна необхідно підвищення рівня електромагнітного моменту. Оскільки більшість методів оптимізації направлено на мінімізацію цільової функції, то як таку обираємо

$$F = -M_e \rightarrow \min, \tag{3}$$

де M_e – електромагнітний момент, що визначений за результатами розрахунку магнітного поля методом скінчених елементів.

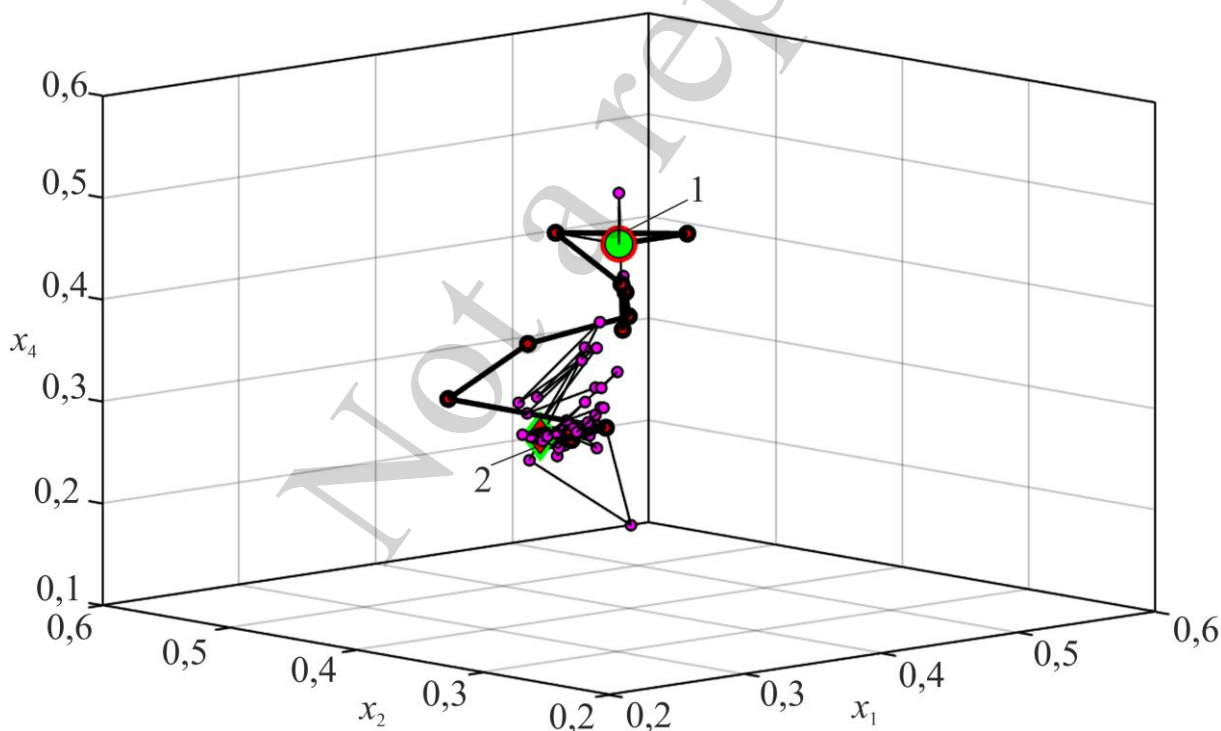
5. 3. Рішення задачі умовної оптимізації геометричних параметрів ротору двигуна

Для вирішення задачі умовної оптимізації геометричних параметрів ротору запропоновано використати програмний комплекс optlab (Україна) [18, 19, 21]. Цей комплекс дозволяє обрати раціональний метод вирішення задачі оптимізації. Для рішення задачі аналізу використовується програмний комплекс FEMM 4.2 (США) [16, 17].

Проведення низки тестових рішень задачі оптимізації показало, що результат рішення не залежить від стартової точки. Це говорить про знаходження одного глобального мінімуму, тобто про те, що цільова функція – не є багатоекстремальною. Тому згідно [18, 19] раціонально використовувати метод Нелдера-Міда.

Хід вирішення задачі наведено на рис. 5 за координатами x_1 , x_2 , x_3 та x_4 . На рис. 5, позначені лише найкращі точки. Початкова точка 1 пошуку позначена колом, а кінцева 2 – ромбом.

Початковою точкою пошуку було обрано точку з відносними координатами $x_1=0,3$ в.о., $x_2=0,3$ в.о. та $x_3=0,2$ в.о. та $x_4=0,5$ в.о.



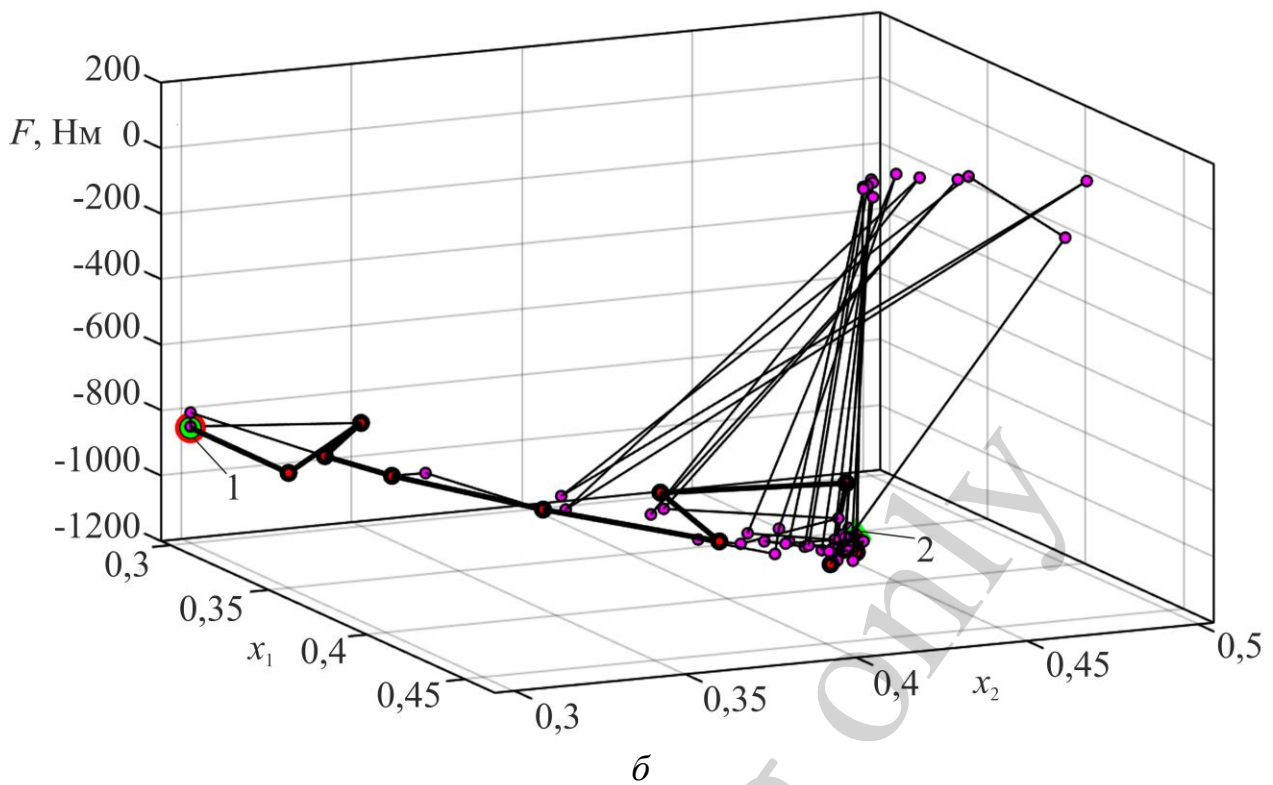


Рис. 5. Хід вирішення задачі оптимізації параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами: *a* – за координатами x_1 , x_2 та x_4 ; *b* – за цільовою функцією та координатами x_1 та x_2 ; 1 – початкова точка пошуку, 2 – кінцева точка пошуку.

Остаточні результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3
Результати вирішення задачі оптимізації

Параметр	Величина
x_1	0,3802 в.о.
x_2	0,449 в.о.
x_3	0,2109 в.о.
x_4	0,2625 в.о.
a_1	0,0195 м
α	$35,9^\circ$
δ	0,0013 м
θ	$-21,38^\circ$ ел.
M_e	1120 Нм

За результатами розрахунків значення цільової функції зменшилося на 32,2 % (з -847 Нм до -1120 Нм), що дає можливість значно підвищити електромагнітний момент лише за допомогою оптимального розташування магнітів на роторі двигуна.

6. Обговорення результатів синтезу ротору синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами

Отримані оптимальний (табл. 3) результат доводить що розміщення постійних магнітів близько до [12], однак повністю розвернути постійні магніти на кут $\alpha=45^\circ$ неможливо в зв'язку з обмеженням за механічною міцністю ротора та розміром постійних магнітів. По результатах розрахунків за запропонованою методикою визначено, що оптимальна відстань від міжполюсної осі та кут повороту магнітів знаходяться на обмеженні, що встановлено за міцністю конструкції ротора. При отриманій геометрії потік постійних магнітів повздовж вісі q найбільший. За результатами вирішення задачі оптимізації повітряний зазор зазнав незначного збільшення у 5,5 %, а кут навантаження зменшився на $21,38^\circ$ ел., що зумовлено значними насиченнями елементів ротору двигуна.

Запропоновано синтез геометричних параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами на підставі вирішення задачі умовної оптимізації. Визначені обмеження, що накладаються на параметри оптимізації. За результатами досліджень ідентифіковано залежність обмеження куту повороту магніту на підставі розрахунків на міцність, що є особливістю цієї задачі.

Розроблена методика може застосовуватися для проектування тягових двигунів електричного транспорту, таких як тролейбуси, електромобілі, електропоїзди та трамваї. Діапазон потужностей двигунів, для яких вона придатна, обмежений потужностями від 40 кВт до 500 кВт. При меншій потужності раціональним є використання секціонованих постійних магнітів, а при більшій виникають технологічні труднощі при зборці ротору. Методика справедлива для застосування двигунів з високо коерцитивними постійними магнітами. За результатами розрахунків значення цільової функції зменшилося на 32,2 % (з -847 Нм до -1124 Нм), що дає можливість значно підвищити електромагнітний момент лише за допомогою оптимального розташування магнітів на роторі двигуна.

В ряді конструкцій [12] в роторі встановлюється додатковий магнітний шунт (отвір у пакеті ротору). Цей отвір та його геометрія надає можливість ще додатково підвищити електромагнітний момент двигуна. Не врахування шунта є можливим недоліком цієї роботи, що може бути усунено при подальших дослідженнях.

Також подальшим розвитком створеної методики по визначенню оптимальної геометрії ротору може бути оптимізація параметрів ротору з секціонованими магнітами та магнітами, що розташовано дугоподібно.

7. Висновки

1. Розроблена математична модель по визначенню електромагнітного моменту синхронно-реактивного двигуна з несекціонованими постійними магнітами. Вона базується на розрахунку магнітного поля двигуна методом скінчених елементів у плоско-паралельній постановці задачі. Запропоновано застосування адаптивної скінченно-елементної сітки при вирішенні задачі. Для синхронно-реактивних двигунів з несекціонованими постійними магнітами розроблено методику синтезу оптимальних геометричних розмірів ротору, яка базу-

ється на вирішенні задачі умовної оптимізації. Встановлено наступні критерії оптимізації, які визначаються у відносних одиницях: відстань магніту від міжполюсної вісі, кут нахилу магніту відносно міжполюсної вісі, повітряний зазор двигуна, а також зміну кута навантаження відносно базової конструкції.

2. Проведено постановку задачі умовної оптимізації ротору синхронно-реактивного двигуна за геометричними критеріями ротору. В якості задачі аналізу запропоновано використати математичну модель магнітного поля двигуна. Встановлено обмеження за геометричними та міцностними показниками у вигляді залежності максимального кута нахилу магніту від розміру, яку апроксимовано сплайн-функцією третього порядку. У якості метода оптимізації обрано метод Нелдера-Міда.

3. За результатами вирішення задачі синтезу параметрів ротору тягового двигуна тролейбусу визначено, що його момент збільшився на 32,2 % порівняно з базовою конструкцією та здобуто оптимальні геометричні параметри розташування постійних магнітів (відстань від меж полюсної вісі 0,0195 м та кут нахилу $35,9^\circ$) повітряного зазору, що становить 0,0013 м, та кута навантаження двигуна, який становить $113,62^\circ$ ел.

Література

1. Лувишис, А. Л. (2017). Асинхронный тяговый привод: начало пути. Локомотив, 1 (721), 44–46.
2. Goolak, S., Gerlici, J., Tkachenko, V., Saprionova, S., Lack, T., Kravchenko, K. (2019). Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 21 (2), 24–31. doi: <https://doi.org/10.26552/com.c.2019.2.24-31>
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., Riabov, I., Iakunin, D., Dubinina, O., Nikonov, O., Domansky, V. (2021). Determining the effect of stator groove geometry in a traction synchronous reluctance motor with permanent magnets on the saw-shaped electromagnetic moment level. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (8 (111)), 68–74. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233270>
7. 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>

8. 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>
9. 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>
10. Moghaddam, R. R. (2011). Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications – Theoretical and Experimental Reevaluation. Stockholm, 260. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:417890/FULLTEXT01.pdf>
11. 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>
12. Yoshida, K. (2002). Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor (DDM). Special edition paper. *JR EAST Technical Review*, 1, 046–052. URL: https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_1/46_52tecrev.pdf
13. Васьковский, Ю. Н., Гайденко, Ю. А., Русятинский, А. Е. (2013). Математическое моделирование и выбор конструктивных параметров тягового синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. *Технічна електродинаміка*, 6, 40–45. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/100755/09-Vaskovsky.pdf?sequence=1>
14. Dehghani Ashkezari, J., Khajeroshane, H., Niasati, M., Jafar Mojibian, M. (2017). Optimum design and operation analysis of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25, 1894–1907. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1603-170>
15. 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>
16. 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>
17. Meeker, D. (2015). Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual. URL: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
18. Severin, V. P. (2005). Vector optimization of the integral quadratic estimates for automatic control systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 44 (2), 207–216.
19. Nikulina, E. N., Severyn, V. P., Kotsiuba, N. V. (2018). Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity.

Bulletin of National Technical University “KhPI”. Series: System Analysis, Control and Information Technologies, 21, 8–13. doi: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2018.21.02>

20. Кононенко, К. Е., Кононенко, А. В., Крутских, С. В. (2015). Параметрическая оптимизация геометрии пазов ротора как способ повышения КПД асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Электротехнические комплексы и системы управления, 2, 45–49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24252080>

21. Liubarskyi, B., Lukashova, N., Petrenko, O., Pavlenko, T., Iakunin, D., Yatsko, S., Vashchenko, Y. (2019). Devising a procedure to choose optimal parameters for the electromechanical shock absorber for a subway car. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (5 (100)), 16–25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176304>

For reading only