

УДК 629.429.3:621.313

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254373

## Оптимізація геометричних параметрів ротору тягового синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами

Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін, О. Я. Ніконов, Д. Б. Любарський, Б. Х. Єрціян

*В роботі розглянуто параметри секціонування та взаємне розташування магнітів у роторі тягового синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами. Запропоновано синтез геометричних параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з секціонованими постійними магнітами на підставі вирішення задачі умовної оптимізації. Для вирішення задачі синтезу розроблено математичну модель по визначенню електромагнітного моменту синхронно-реактивного двигуна з секціонованими постійними магнітами. Вона базується на розрахунку електромагнітного моменту двигуна за результатами скінчено-елементного аналізу магнітного поля у плоско-паралельній постановці задачі. Модель реалізована в середовищі скінчено-елементного аналізу FEMM та дає можливість визначати електромагнітний момент двигуна при різноманітному секціонуванні постійних магнітів. В якості задачі аналізу запропоновано використати математичну модель магнітного поля двигуна. Проведено постановку задачі умовної оптимізації ротору синхронно-реактивного двигуна за геометричними критеріями ротору. Встановлено обмеження за геометричними, міцносними показниками, а також за рівнем електромагнітного моменту. У якості метода оптимізації обрано метод Нелдера-Міда.*

*За результатами вирішення задачі синтезу параметрів секціонованого ротору тягового двигуна приводу коліс тролейбусу визначено, що об'єм постійних магнітів вдалось знизити 2.27 рази, порівняно з базовою конструкцією та здобуто їх оптимальні геометричні розміри (5 мм, 5.2 мм та 5 мм), відстані між ними 17,8 мм та 15,3 мм, а також кут навантаження двигуна, який становить  $121,12^\circ$  ел.*

*За результатами вирішення задачі синтезу параметрів секціонованого ротору тягового синхронно-реактивного двигуна тролейбусу визначено оптимальні його геометричні параметри.*

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

### 1. Вступ

Перехід від колекторного тягового приводу до приводів змінного струму є на теперішній час загальносвітовою практикою [1–3] на колісному рухомому складі магістрального, міського та промислового транспорту.

Найбільш поширене застосування знайшли у цій галузі асинхронні електроприводи. З початком ХХІ сторіччя асинхронний тяговий привод знайшов масове застосування на тролейбусах виробництва Євросоюзу: «Solaris Bus &

Coach» S. A. (Польща), Škoda Transportation (Чехія). Так саме й на тролейбусах інших країн-виробників: «Busscar Ônibus S.A.» (Бразилія), «Богдан» (Україна), «Елетронтранс» (Україна), «Еталон» (Україна). А також трамваях виробництва «Татра-Юг» (Україна) та «Електронтранс» (Україна) та інших [4]. Широке застосування він також знайшов у електромобілях виробництва Tesla [5]. На рухомому складі залізниць також найбільш поширеним є асинхронний тяговий привод. Так, наприклад, на електровозах 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 HRCS2 виробництва Hyundai Rotem (Південна Корея) та EJ 675 Škoda Transportation (Чехія), що експлуатується Укрзалізницею. Схожа ситуація і на світових залізницях «LORIC» (Китай), «Alstom», «ADtranz», «Bombardier», «Siemens AG» (Європейський союз). 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].

До світових тенденцій енергозбереження прагнуть альтернативні підходи у тяговому приводі. Одним з них є використання синхронних тягових двигунів [6]. Іншим підходом для підвищення ККД тягового електроприводу з такими двигунами є використання синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів [6], але значна маса висококоерцетивних постійних магнітів суттєво збільшує затрати на виробництво таких електродвигунів.

Важливою вимогою до тягового електроприводу є необхідність забезпечення широкого діапазону частоти обертання та моменту, а також високі енергетичні показники, необхідні не тільки у режимі близькому до номінального, а й при малих та максимальних швидкостях обертання. З аналізу, проведеного у роботі [7] витікає, що такі характеристики можуть забезпечити синхронно-реактивні двигуни з постійними магнітами (permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor – PMSynRM, PMA-SynRel). В роботі [8] зазначається, 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 альтернативою електроприводу з асинхронними тяговими двигунами. Тому дослідження, які направлено на підвищення масогабаритних та енергетичних показників синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами, є актуальними.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В роботі [9] проведено аналіз конструкції та принципу дії синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами, встановленими у роторі як секціонованого так і не секціонованого типу. Аналіз конструкції статора синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами, який наведено в [10], відзначає подібність його конструкції до статора асинхронного двигуна. Конструкції роторів цих двигунів мають значні відмінності. Ротор синхронного двигуна в радіальному напрямку для підвищення реактивного обертаючого моменту має та-

кі особливості. По-перше, його поділено на потокопровідні канали. Кількість каналів визначається сегментацією ротора двигуна. По-друге, постійні магніти можуть бути поділені у напрямку, близькому до напрямку потоку реакції якоря поточковими бар'єрами [11], в які встановлено постійні магніти з рідкоземельних елементів типу NdFeB або фериту Y30 [12]. Відповідно до класифікації, яку запропоновано у [11], кількість ліній бар'єрів (отворів в осерді ротору) може бути різною. Від однієї лінії, яку розташовано перпендикулярно вісі  $q$  двигуна, як це зазначено в роботі [13], та повздовж вісі  $d$ , що наведено у роботі [14] та становлять один шар розташування магнітів який має додаткову механічну міцність конструкції. Однак недоліком [14] підвищений рівень потоків розсіяння. Це не секціонований тип. До п'яти ліній, які розташовано під кутом до осі  $q$ , як наведено у роботі [15], – секціонований тип.

Принцип конструкції ротору двигуна заснований в наступному. Постійні магніти ротору рівномірно намагнічені в напрямі осі  $q$ . Проникність постійних магнітів близька до повітря. Таким чином, лінія бар'єрів (секцій) створює напрям з високим опором і магнітною анізотропією в напрямку вісі  $q$ . Залізо ротору сегментоване, що необхідно для проведення основного магнітного потоку за віссю  $d$  [7]. Додатковою функцією є забезпечення механічної міцності конструкції ротору.

Як зазначається в роботі [12], визначення розмірів та параметрів роторів синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами раціонально здійснювати на підставі скінчено-елементного аналізу у поєднанні з багатокритеріальною оптимізацією, як це висвітлено у роботі [16]. Розглянута в роботі [7] методика проектування надає можливість визначити лише основні параметри статора двигуна, товщину та ширину постійних магнітів. В роботі [11] проводиться аналогічний аналіз для роторів з несекціонованими магнітами, що є лише одним з різновидів конструкції. Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого визначенню оптимальної геометрії ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами.

### **3. Мета і завдання дослідження**

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

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити скінчено-елементну модель магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами;
- поставити задачу умовної оптимізації параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами для приводу коліс тролейбуса;
- провести синтез тягового двигуна тролейбуса шляхом вирішення задачі оптимізації геометричних параметрів ротору.

#### **4. Матеріали та методи дослідження**

Об'єктом наукового дослідження є процес пошуку оптимальної геометричних параметрів ротору тягового синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами. Провівши аналітичний огляд літературних даних щодо конструкцій роторів двигунів типу, що досліджується, запропоновано гіпотезу, за якою обрання оптимальних розмірів шарів секціонованих магнітів дозволить зменшити їх загальний об'єм при збереженні рівня електромагнітного моменту двигуна.

В дослідженні прийнято наступні спрощення. Розглядається конструкція призматичних секціонованих магнітів з трьома шарами та геометричними вирізами. При вирішенні задачі аналізу використовується спрощення щодо двомірної постановки задачі без урахування торцевих розсіювань. Урахування цих припущень та спрощень можливо при подальших дослідженнях тягових двигунів типу, що розглядається.

За результатами аналізу попередніх досліджень [11, 17, 18] основою методики запропоновано покласти оптимальний синтез на підставі вирішення задачі умовної оптимізації геометричних параметрів двигуна. В основу задачі аналізу покладено метод скінчених елементів для розрахунку магнітного поля у плоскопаралельній постановці задачі. За результатами розрахунку магнітного поля двигуна визначається його електромагнітний момент. Аналогічній підхід було застосовано до оптимізації параметрів несекціонованого ротору в роботі [11] та асинхронних двигунів в роботі [19]. Адекватність отриманих результатів підтверджувалась використанням апробованих програмних комплексів моделювання магнітного поля FEMM (США) [20, 21] та пакетів optlab (Україна) [17, 18, 22].

#### **5. Результати дослідження геометричних параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами**

##### **5.1. Математична модель магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з постійними секціонованими магнітами**

В роботі [7] наведені основи проектування синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами, за якими можливо визначити приблизні габарити постійних магнітів. Однак параметри секціонування та взаємне розташування магнітів у роторі значно впливає на рівень електромагнітного моменту, як це зазначається в [7, 8]. В роботі проведено постановку задачі аналізу для ротору з секціонованими постійними магнітами. Ця конструкція є альтернативним підходом до конструкції, запропонованої в [11] 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 дані двигуна, що їх наведено у табл. 1. Розрахункові дані постійного магніту та його матеріалу наведено у табл. 2.

За базову конструкцію ротора двигуна обрано секціонованими постійними магнітами, які знаходяться вирізах пакету ротора. Магніти призматичної форми знаходяться в отворах ротору. Для спрямування магнітного потоку у роторі знаходяться повітряні опори магнітного потоку. Базова геометрія двигуна наведена на рис. 1.

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	0,15
Односторонній повітряний проміжок, м	0,003
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	1
Товщина магніту сумарна, м	0,03
Кількість шарів секціонування	3
Ширина магніту, м	0,09
Матеріал магнітів	Nd-Fe-B
Залишкова магнітна індукція, Тл	1,0
Коерцитивна сила по намагніченості, А/м	850 000

Опираючись на досвід досліджень, проведених в [11], для подальших досліджень використано скінчено-елементний метод визначення електромагнітного моменту. Проведено постановку 2d задачі розрахунку плоско-паралельного магнітного поля. Застосування цього методу надає можливості врахувати розподіл магнітного потоку між секціонованими магнітами ротора, насичення його частин в залежності від розташування магнітів. Для вирішення задачі використано комплекс скінчено-елементного моделювання FEMM [6, 20, 22]. Поперечний розріз двигуна, у області, що розраховується, поділено на скінчені елементи. Тип елементів – трикутний. Застосовано скінчено-елементну сітку адаптивного типу, яка дає можливість визначити геометрію ротору та секціонованих постійних магнітів (рис. 2). Рівень струмів якоря відповідає номінальному режиму роботи двигуна. Розподіл магнітного поля двигуна за результатами розрахунку прикуті навантаження 135° ел. наведено на рис. 3.

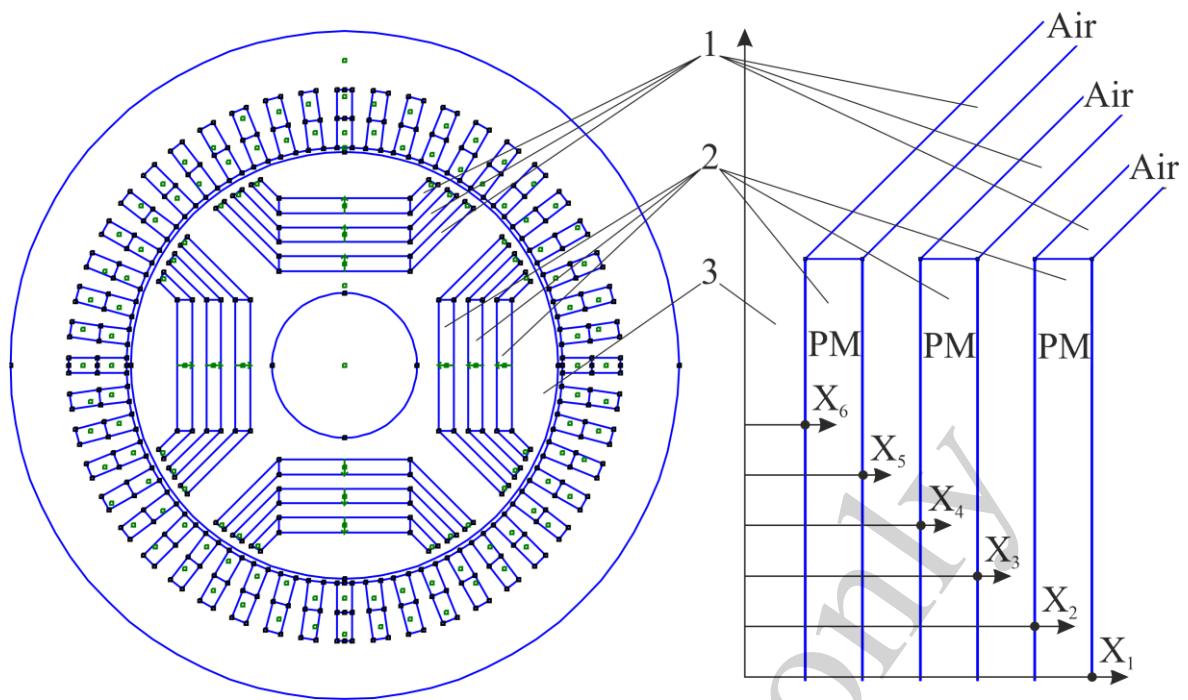


Рис. 1. Базова геометрія синхронно-реактивного двигуна з секціонованими постійними магнітами: 1 – вирізи в осерді ротору; 2 – постійні магніти; 3 – осердя ротору

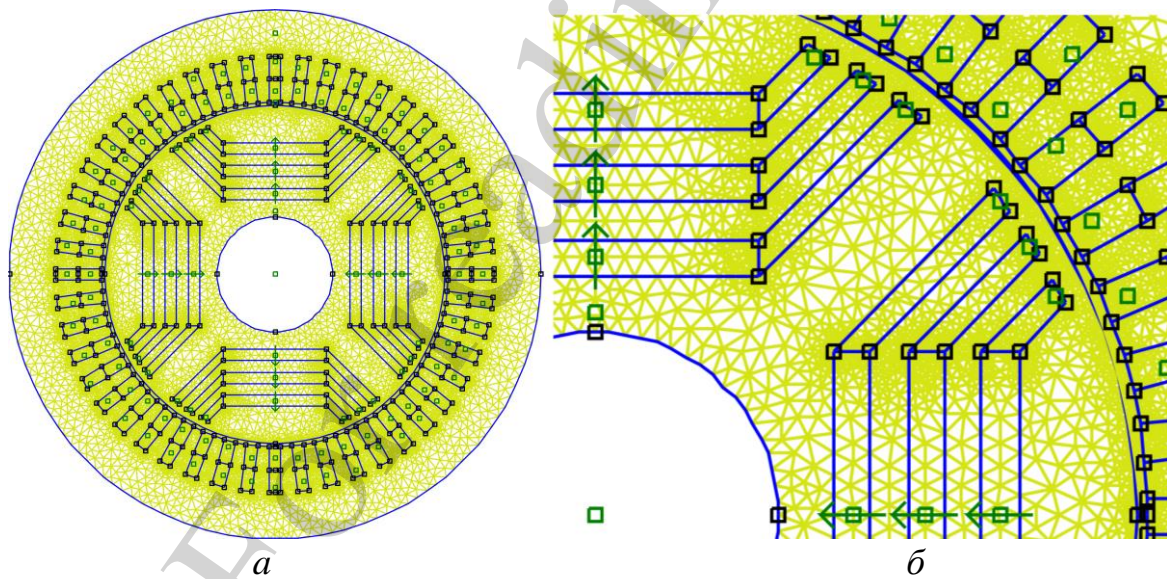


Рис. 2. Скінчено-елементна сітка синхронно-реактивного двигуна з секціонованими постійними магнітами: *a* – загальний вигляд; *б* – зона постійних магнітів

Як і в роботі [11] за результатами розрахунку магнітного поля визначається електромагнітний момент двигуна використовуючи стандартні функції FEMM [20].

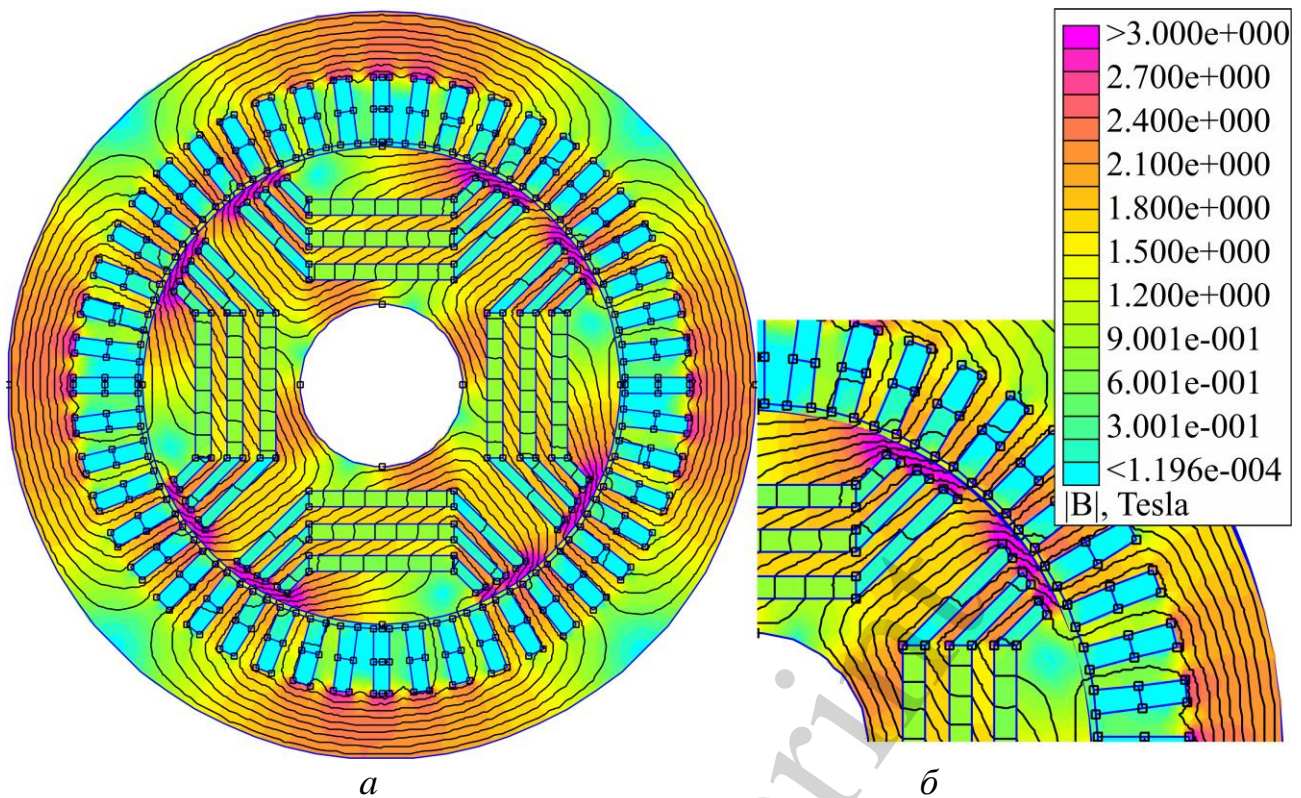


Рис. 3. Результати розрахунку магнітного поля синхронно-реактивного двигуна з секціонованими постійними магнітами в номінальному режимі: *a* – загальний вигляд; *б* – зона постійних магнітів.

## 5. 2. Задача оптимізації параметрів ротору з секціонованими магнітами двигуна для приводу коліс тролейбуса

В роботі розглядається ротор з секціонуванням постійних магнітів на три частини. Це найбільш поширене на практиці технічне рішення. В розглянутій геометрії збільшення кількостей шарів секціонування неможливо за технологічними ознаками. Завдяки значному зниженню товщини постійних магнітів проблемою є розміщення їх в отворах ротору.

Параметри задачі оптимізації. В якості параметрів задачі раціонально вибрати товщину постійних секціонованих магнітів та проміжків між ними. Однак з метою спрощення формалізації задачі оптимізації пропонується в якості параметрів обрати координати постійних магнітів за віссю  $q$  двигуна. Ці координати мають назви  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$  (рис. 1). Також до параметрів слід додати зміну кута ( $\theta$ ) навантаження відносно базової конструкції в електричних градусах. Базовий кут навантаження для конструкції обрано в  $135^\circ$  ел. Управління тяговим приводом тролейбусу забезпечує режим підтримання кута навантаження при розгоні та зменшує кут навантаження в режимі підвищеної швидкості руху [5, 7, 9, 11]. Визначення кута навантаження ідентифікує параметри системи керування двигуна.

Встановлюємо обмеження, що накладаються на параметри оптимізації.

1) Обмеження за міцністю ротора.

На взаємне розташування вирізів в осерді ротору накладаються обмеження механічної міцності конструкції двигуна. За допомогою методики, наведеної в [7], визначено мінімальну допустиму товщину перетинів між шарами постійних магнітів та мінімальні товщини постійних магнітів, які для розглянутої задачі складають  $X_{dmin}=0,009$  м та  $X_{min}=0,005$  м відповідно.

Формулювання обмежень можливо викласти наступним чином для постійних магнітів:

$$\begin{aligned}x_1-x_2 < X_{min}; \\ x_3-x_4 < X_{min}; \\ x_5-x_6 < X_{min}.\end{aligned}\tag{1}$$

А для міжшарових проміжків

$$\begin{aligned}x_2-x_3 < X_{dmin}; \\ x_4-x_5 < X_{dmin}.\end{aligned}\tag{2}$$

2) Геометричні обмеження задачі оптимізації. На параметри оптимізації накладаються наступні геометричні обмеження, пов'язані з розмірами ротору двигуна

$$0 \text{ м} < x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 < 0,065 \text{ м}.\tag{3}$$

3) Обмеження на кут навантаження двигуна, обумовлений принципом його дії, знаходиться в межах

$$-45^\circ \text{ ел.} < \theta < 45^\circ \text{ ел}.\tag{4}$$

4) Обмеження за заданим моментом двигуна.

На практиці часто виникає задача проектування тягового двигуна з наперед заданим рівнем електромагнітного моменту. Тому рівень заданого електромагнітного моменту може бути додатковим обмеженням, що накладається в задачі

$$M_e > 970 \text{ Nm},\tag{5}$$

де  $M_e$  – електромагнітний момент, який визначено за результатами розрахунку магнітного поля.

В зв'язку з різним порядком значень параметрів  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$  та куту  $\theta$  подальші розрахунки доцільно проводити в міліметрах, що значно спростить вирішення задачі оптимізації.



В якості цільової функції [11] раціонально обрати сумарну товщину постійних магнітів двигуна, тому що ця величина пропорційна об'єму та масі постійних магнітів, які мають найбільшу вартість у конструкції

$$F=(x_1-x_2)+(x_3-x_4)+(x_5-x_6)\rightarrow\min. \quad (6)$$

Таким чином, цільова функція  $F$  визначає затрати на виробництво двигуна.

### 5. 3. Вирішення задачі оптимізації параметрів секціонованого ротору двигуна

З метою вирішення задачі умовної оптимізації геометричних параметрів секціонованого ротору проведено постановку задачі в програмному комплексі optlab (Україна) [11, 19–21], який розроблено в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ», Україна). Великою перевагою optlab є можливість використання різних методів оптимізації та обрання різних стартових точок метода. Вирішення задачі аналізу магнітного поля проводиться за допомогою комплексу FEMM 4.2 (США) [11, 18, 19].

Пробне рішення задачі оптимізації з різних стартових точок та різними методами показало, що результат рішення не залежить від стартової точки, як і в задачі [11]. Це свідчить про знаходження однозначного глобального мінімуму. Таким чином цільова функція – не є багатоекстремальною. Схожість фізичних процесів в задачі, що розглядається, та наведених в [11], також свідчить про небагатоекстремальність задачі. Згідно досвіду досліджень [11, 20, 21] раціонально використовувати метод Нелдера-Міда.

Хід вирішення задачі наведено на рис. 4 за координатами  $x_1$ ,  $x_2$ , та цільовою функцією. На рис. 5 позначені лише найкращі точки. Початкова точка 1 пошуку позначена колом, а кінцева 2 – ромбом.

Стартовою точкою пошукового алгоритму було обрано точку з координатами  $x_1=50$  мм,  $x_2=40$  мм,  $x_3=30$  мм,  $x_4=20$  мм,  $x_5=10$  мм,  $x_6=0$  мм, та  $\theta=0^\circ$  ел.

Результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3  
Результати вирішення задачі оптимізації

Параметр	Величина
$x_1$	49,8 мм
$x_2$	44,8 мм
$x_3$	29,5 мм
$x_4$	24,3 мм
$x_5$	6,5 мм
$x_6$	1,5 мм
$\theta$	$-13,88^\circ$ ел.
$F$	15,2 мм

За результатами розрахунків значення цільової функції зменшилося у 2,27 рази (з 30 мм до 13,2 мм), що дає можливість значно знизити собівартість конструкції двигуна зі збереженням вимог до нього.

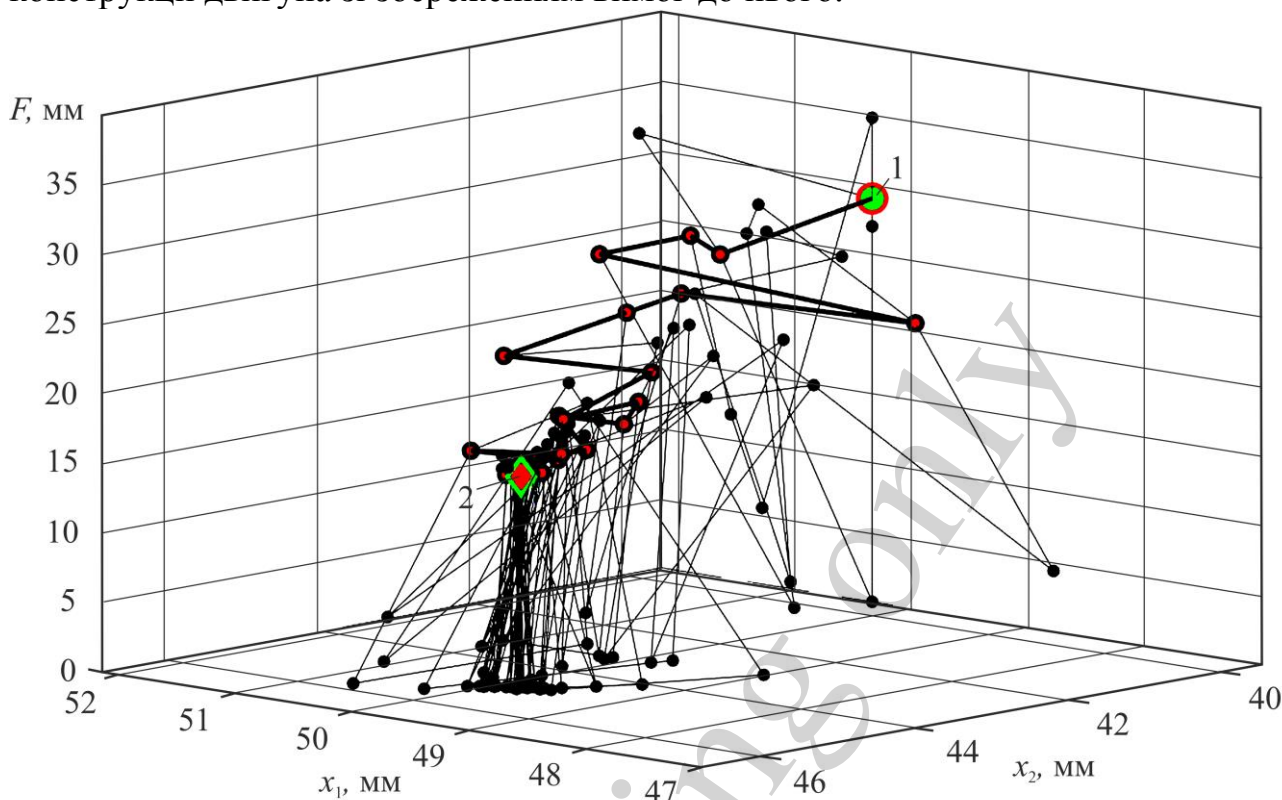


Рис. 4. Хід вирішення задачі оптимізації параметрів ротору синхронно-реактивного двигуна з секціонованими постійними магнітами за цільовою функцією та координатами  $x_1$  та  $x_2$ : 1 – початкова точка пошуку; 2 – кінцева точка пошуку

## 6. Обговорення результатів синтезу секціонованого ротору синхронно-реактивного двигуна

За результатами проведених досліджень, які наведено у табл. 3, показано, що товщини постійних магнітів в оптимальній конструкції значно нижчі за базові, отримані за методикою для [7]. Це може бути пояснено значно меншим рівнем потоків розсіяння, ніж у конструкції без секціонування. Отримані товщини магнітів складають відповідно 5 мм., 5.2 мм. та 5 мм. Вони також близькі до обмежень за механічною міцністю. Проміжки між постійними магнітами не рівномірні: зовнішній на 15 % більший за внутрішній та складає 17,8 мм, що обумовлено можливістю зменшення насичення в напрямку потоку по вісі  $d$  двигуна. Як і в задачі з несекціонованими магнітами [11], кут навантаження зменшився на  $13,88^\circ$  ел., що зумовлено значними насиченнями елементів ротору двигуна.

Проведено синтез параметрів секціонованого ротору синхронно-реактивного двигуна з постійними магнітами на основі вирішення задачі умовної оптимізації. При вирішенні задачі визначені наступні обмеження, що накладаються на параметри оптимізації: обмеження за міцністю ротора, геометричні

обмеження задачі оптимізації, обмеження на кут навантаження двигуна та обмеження за заданим моментом двигуна.

Розроблена методика може застосовуватися для проектування тягових двигунів електричного транспорту, таких як індивідуальний електротранспорт (гіроборди, електровелосипеди та інше), тролейбуси, електромобілі, електропоїзди, трамваї та квадрокоптери. Діапазон потужностей двигунів, для яких вона придатна, обмежений потужностями від 1 кВт до 250 кВт. При більшій потужності раціональним є використання несекціонованих постійних магнітів, а при меншій раціонально перейти на інший тип електродвигуна. Наведена методика справедлива для застосування двигунів з висококоерцитивними постійними магнітами та кількістю шарів секціонування – 3. За результатами розрахунків значення цільової функції зменшилося у 2,27 рази (з 30 мм до 13,2 мм), що дає можливість значно знизити затрати на виробництво двигуна при збереженні його характеристик.

В ряді конструкцій [13] в роторі магніти встановлюються в дугоподібні отвори, що зменшує концентрацію зон насичення в роторі та зменшує опір основному потоку. Не врахування можливості дугоподібного розташування магнітів є недоліком роботи. Також до недоліків можливо віднести її застосовність лише для трьох шарів секціонування магнітів.

Також подальшим розвитком створеної методики по визначенню оптимальної геометрії ротору може бути оптимізація параметрів ротору з дугоподібними секціонованими магнітами.

## **7. Висновки**

1. Розроблена математична модель по визначенню електромагнітного моменту синхронно-реактивного двигуна з секціонованими постійними магнітами. В основу моделі покладено визначення електромагнітного моменту на підставі розрахунку магнітного поля двигуна методом скінчених елементів у плоско-паралельній постановці задачі. При вирішенні задачі застосовано адаптивну скінченно-елементну сітку. Для синхронно-реактивних двигунів з постійними магнітами розроблено методику синтезу секціонованого ротору, що базується на вирішенні задачі умовної оптимізації. Встановлено наступні критерії оптимізації: координати постійних магнітів за віссю  $q$  двигуна та зміна 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, міцносними параметрами та заданим рівнем електромагнітного моменту. У якості метода оптимізації обрано метод Нелдера-Міда.

3. За результатами вирішення задачі синтезу параметрів ротору тягового двигуна тролейбусу визначено, що об'єм постійних магнітів вдалось знизити у 2,27 рази порівняно с базовою конструкцією та здобуто їх оптимальні геометричні розміри (5 мм, 5.2 мм та 5 мм.), відстані між ними 17,8 мм та 15,3 мм та кут навантаження двигуна, який становить  $121,12^\circ$  ел.

## Література

1. Лувишис, А. Л. (2017). Асинхронный 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/ifi.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: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:417890/FULLTEXT01.pdf>
11. Liubarskyi, B., Iakunin, D., Nikonov, O., Liubarskyi, D., Vasenko, V., Gasanov, M. (2021). Procedure for selecting optimal geometric parameters of the rotor for a traction non-partitioned permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (114)), 27–33. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247208>

12. 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>
13. Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor (DDM). URL: [https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf\\_1/46\\_52tecrev.pdf](https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_1/46_52tecrev.pdf)
14. Васьковский, Ю. Н., Гайденок, Ю. А., Русятинский, А. Е. (2013). Математическое моделирование и выбор конструктивных параметров тягового синхронного электродвигателя с постоянными магнитами. *Технічна електродинаміка*, 6, 40–45. URL: <https://docplayer.com/38603915-Udk-matematicheskoe-modelirovanie-i-vybor-konstruktivnyh-parametrov-tyagovogo-sinhronnogo-elektrodvigatelya-s-postoyannymi-magnitami.html>
15. 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>
16. 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>
17. 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.
18. Nikulina, E. N., Severin, 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>
19. 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 (38), 45–49.
20. 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>
21. Meeker, D. (2015). *Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User’s Manual*. URL: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
22. 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>