УДК 621.313.17 **doi: 10.20998/2079-3944.2021.1.06**

А.П. ЛИХОГУБ, М.А. КОВАЛЕНКО, І.В.ТКАЧУК, А.О. ГОНЧАРУК

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТОРЦЕВОГО МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ ПОДВІЙНИМ СТАТОРОМ

Розроблено методологію для оптимізаційно-параметричного розрахунку геометричних параметрів конструкції торцевого магнітоелектричного генератора із постійними магнітами. Розроблену методологію можливо використовувати для розрахунку та оптимізації геометричних параметрів в автоматизованому режимі практично для будь-якого типу електромеханічного перетворювача енергії. Робота розробленої системи базується на взаємопов'язаних зв'язках між системою автоматизованого проектування, програмного комплексу та чисельного розрахунку електромагнітного поля із можливістю зворотного зв'язку та параметризації та обчислювального середовища типу Matlab. В роботі побудовано параметризовану геометричну модель на прикладі торцевого магніторлектричного генератора із подвійним статором. В подальшому проведено параметричну оптимізацію геометричних параметрів, використовуючи розроблений алгоритм. Використання розробленого схемного рішення зменшую час, витрачений дослідником на розрахунок геометрії та оптимізацію. Параметризація проводиться на всіх етапах побудови окремої деталі, геометрію якої планується змінювати, та у кожній деталі збірок, якщо такі передбачені в конкретному випадку. Тобто, за допомогою розробленої моделі, можливо запрограмувати оптимізацію як окремого конструктивного елемента досліджуваної системи так і об'єкта в цілому. В процесі оптимізації змінювались основні геометричні параметри досліджуваного торцевого генератора із подвійним статором: ярмо статора, повітряний проміжок, зубцево-пазова зона статора, елементи корпусу. В результаті параметричної оптимізації геометрії прототипу ТМГПМ р подвійним статором вдалося зменшити геометричні розміри за рахунок оптимізації величини магнітної індукції на окремих ділянках магнітного осердя досліджуваного генератора. За рахунок застосування розробленого алгоритму вдалося досягти зменшення вартості генератора, а також об'єму магнітопровода на 18,1 %, та 24.3 % відповідно. Це свідчить про ефективність розробленого алгоритму та можливість використання даного алгоритму в подальших дослідженнях.

Ключові слова: торцевий генератор, магнітоелектричне збудження, параметрична оптимізація, постійні магніти, математичне моделювання.

А.П. ЛИХОГУБ, М.А. КОВАЛЕНКО, И.В.ТКАЧУК, А.О. ГОНЧАРУК

ПАРАМЕТРИСЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТОРЦЕВОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С ДВОЙНЫМ СТАТОРОМ

Разработана методология для оптимизационно-параметрического расчета геометрических параметров конструкции торцевого магнитоэлектрического генератора с постоянными магнитами. Разработанную методологию можно использовать для расчета и оптимизации геометрических параметров в автоматизированном режиме практически для любого типа электромеханического преобразователя энергии. Работа разработанной системы базируется на взаимосвязанных связях между системой автоматизированного проектирования, программного комплекса и численного расчета электромагнитного поля с возможностью обратной связи и параметризации и вычислительной среды типа Matlab. В работе построено параметризованных геометрическую модель на примере торцевого магнитоэлектрического генератора с двойным статором. В дальнейшем проведено параметрическую оптимизацию геометрических параметров, используя разработанный алгоритм. Использование разработанного схемного решения уменьшает время, потраченное исследователем на расчет геометрии и оптимизацию. Параметризация проводится на всех этапах построения отдельной детали, геометрию которой планируется менять, и в каждой детали сборников, если таковые предусмотрены в конкретном случае. То есть, с помощью разработанной модели, можно запрограммировать оптимизацию как отдельного конструктивного элемента исследуемой системы и объекта в целом. В процессе оптимизации изменялись основные геометрические параметры исследуемого торцевого генератора с двойным статором: ярмо статора, воздушный промежуток, зубцового-пазовая зона статора, элементы корпуса. В результате параметрической оптимизации геометрии прототипа ТМГПМс двойным статором удалось уменьшить геометрические размеры за счет оптимизации величины магнитной индукции на отдельных участках магнитного сердечника исследуемого генератора. За счет применения разработанного алгоритма удалось достичь уменьшения стоимости генератора, а также объема магнитопровода на 18.1%, и 24.3% соответственно. Это свидетельствует об эффективности разработанного алгоритма и возможность использования данного алгоритма в дальнейших исследованиях

Ключевые слова: торцевой генератор, магнитоэлектрическое возбуждение, параметрическая оптимизация, постоянные магниты, математическое моделирование.

A.P. LYKHOHUB, M.A. KOVALENKO, I.V.TKACHUK, A.O. HONCHARUK

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF MAGNETOELECTRIC GENERATOR WITH DOUBLE STATOR

A methodology for the optimization-parametric calculation of geometric parameters of the design of an axial-flux permanent magnet generator has been developed. The developed methodology can be used to calculate and optimize geometric parameters in an automated mode for almost any type of electromechanical energy converter. The operation of the developed system is based on the interconnections between the computer-aided design system, software package, and numerical calculation of the electromagnetic field with the possibility of feedback and parameterization and a computing environment such as Matlab. The parameterized geometric model is constructed on the example of an axial-flux permanent magnet generator with a double stator. Subsequently, parametric optimization of geometric parameters was performed using the developed algorithm. The use of the developed solution reduces the time spent by the researcher on the calculation of geometry and optimization. Parameterization is performed at all stages of construction of a single part, the geometry of which is planned to change, and in each part of the assemblies if any in a particular case. That is, with the help of the developed model, it is possible to program the optimization of both a separate structural element of the studied system and the object as a whole. In the process of optimization, the main geometrical parameters of the investigated end generator with double side changed: stator yoke, air gap, gear-groove zone of the stator, housing elements. As a result of parametric optimization of the geometry of the prototype, it was possible to reduce the geometric dimensions by optimizing the magnitude of the magnetic induction in some areas of the magnetic core of the studied generator. Due to the application of the developed algorithm, it was possible to reduce the cost of the generator, as well as the volume of the magnetic circuit by 18.1% and 24.3%, respectively. This indicates the effectiveness of the developed algorithm and the possibility of using this algorithm in further research

Key words: axial-flux generator, magnetoelectric excitation, parametric optimization, permanent magnets, mathematical modeling.

Вступ. Торцеві магнітоелектричні генератори із постійними магнітами (ТМГПМ) широко використовуються в різноманітних галузях техніки [1, 2]. Вони застосовуються в якості тихохідних багатополюсних електрогенераторів або в якості високомоментних тягових двигунів. Магнітоелектричні торцеві синхронні генератори поєднують в собі переваги генераторів із постійними магнітами із можливістю регулювання вихідних величин за допомогою додаткової підмагнічу

© А.П. Лихогуб, М.А. Коваленко, І.В. Ткачук, А.О. Гончарук, 2021

вальної обмотки.

Традиційних методик для точного розрахунку основних розмірів таких генераторів не існує. Для розрахунку основних розмірів використовуються аналітичні методи або використовується досвід інженерів-конструкторів. Такий підхід не забезпечує оптимальні геометричні (а отже і електромагнітні) параметри розробленого генератора. Для пошуку оптимальних геометричних параметрів розробники використовують всі відомі чисельні та аналітичні методи [3]. Це збільшує час та вартість кінцевої розробки.

Актуальність. Актуальним напрямком є оптимізація геометрії досліджуваного торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором. Параметрична оптимізація геометричних розмірів дозволить зменшити металоємність та кінцеву вартість готової конструкції генератора.

За наявності технічного завдання та методик розрахунку, вибір геометричних параметрів конструкції досліджуваного торцевого генератора здійснюється відповідно наведених рекомендацій відносно прототипу та за допомогою аналітичного або польового розрахунку. Відсутність технічного завдання та експлуатаційних характеристик торцевих магнітоелектричних генераторів із подвійним статором робить неможливим правильний вибір прототипу. В даній роботі вихідні геометричні параметри генератора обрані в результаті наближеного аналітичного розрахунку з урахуванням досвіду провідних інженерів-конструкторів електромеханічних пристроїв.

Ескіз досліджуваного генератора показано на рис. 1.

На рис. 1 показано: 1 – диск ротора; 2 – магнітне осердя статора; 3 – обмотка якоря; 4 – постійні магніти; 5 – підмагнічуючи обмотка; 6 – корпус генератора.

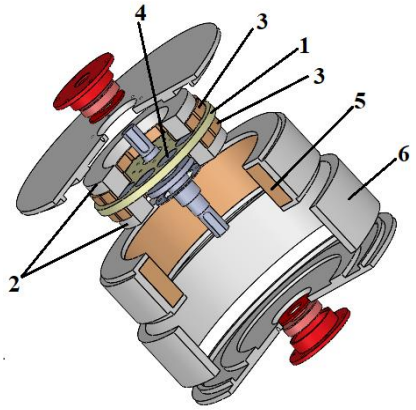

Рис. 1. Ескіз досліджуваного ТМГПМ

Метою роботи є розробка методики для оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії торцевого магнітоелектричного генератора із подвійним статором та оптимізації його геометричних параметрів.

Для пошуку оптимальних геометричних співвідношень індуктора та якоря, величини повітряного проміжку, необхідно розробити параметризовану модель, яка дозволяє зміну геометрії під час електромагнітного розрахунку при мінімальних часових та людських ресурсах. Це прискорить подальше дослідження виливу геометричних співвідношень на досліджувані параметри в електромагнітному розрахунку.

Математична модель. На рис. 2-5 наведено принципові схему оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії ЕМПЕ, зокрема досліджуваного генератора. Використання даних схематичних рішень дозволяє зменшити час, витрачений дослідником на розрахунок та оптимізацію, а також значно розширити функціонал використаних пакетів прикладних програм, шляхом їх інтеграції в єдиний комплекс.

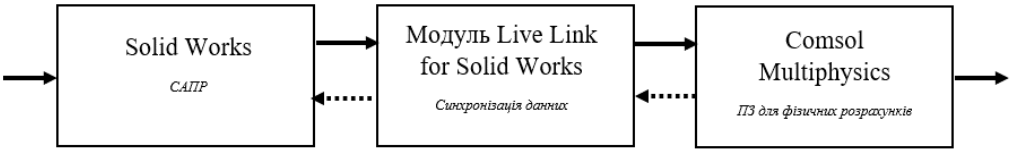

Рис. 2. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії за допомогою двосторонньої інтеграції пакетів Comsol Multiphysics та Solid Works

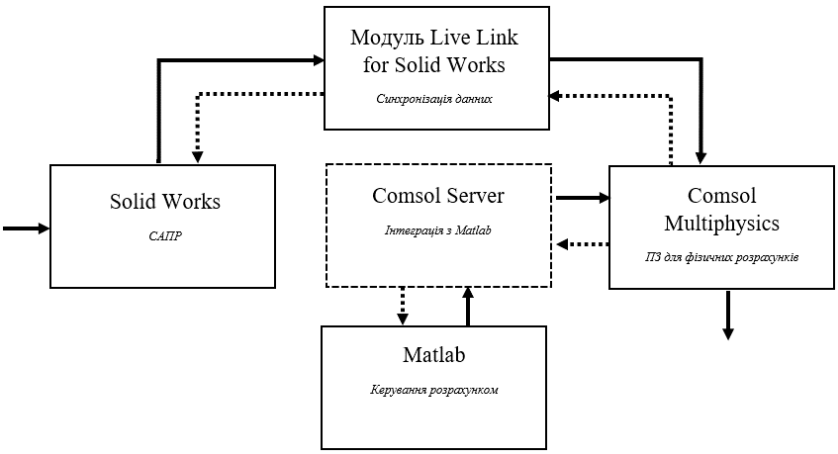

Рис. 3. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії за допомогою пакетів Solid Works, Comsol Multiphysics та Matlab. Варіант 1.

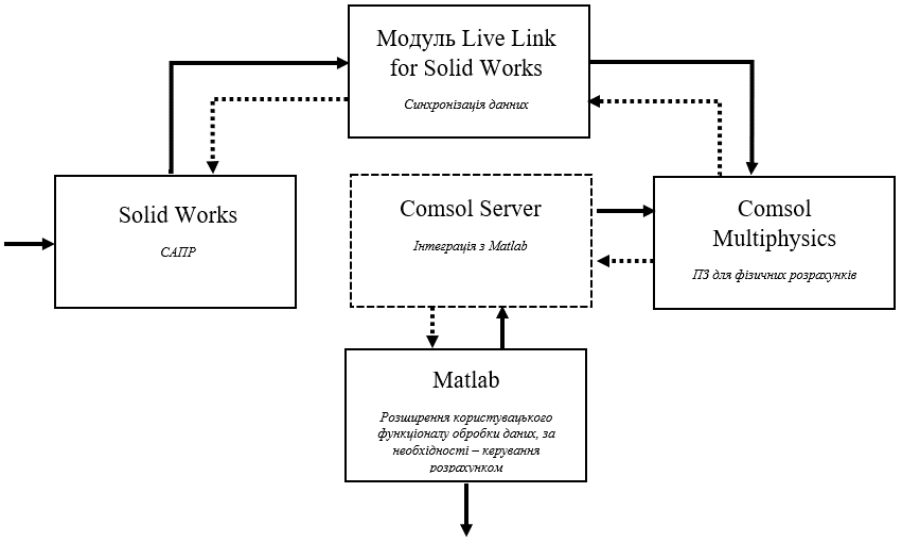

Рис. 4. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку геометрії за допомогою пакетів Solid Works, Comsol Multiphysics та Matlab. Варіант 2.

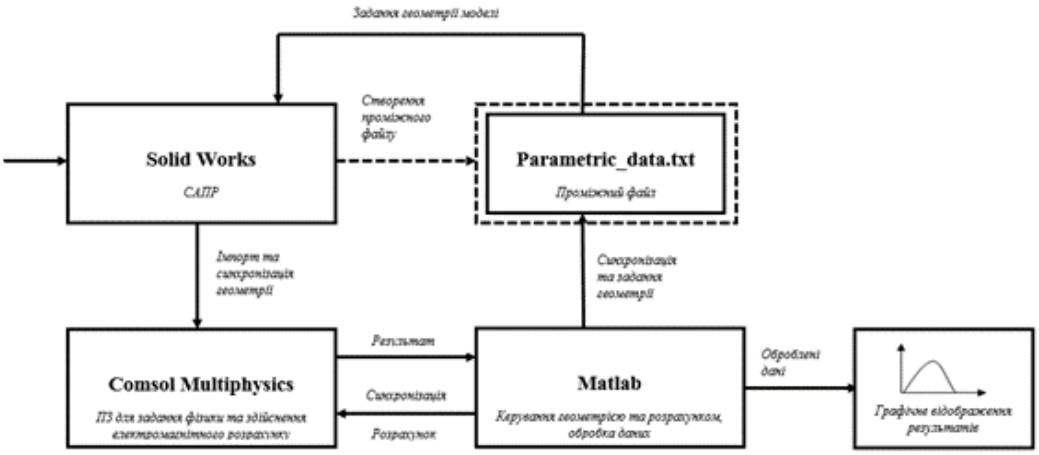

Рис. 5. Принципова схема оптимізаційно-параметричного розрахунку, що також може бути використана для моделей складної топології

Схема, наведена на рис. 5 може бути використана як для простої, так і для складної топології. Для реалізації розробленої структури та електромагнітного розрахунку параметризованої моделі використовуються наступні пакети прикладних програм:

- Solid Works – використовується для розробки параметризованої тривимірної моделі;

Comsol Multiphysics – використовується для розробки фізичної моделі, електромагнітного розрахунку та синхронізації геометрії з використанням модуля Live Link With Solid Works;

Comsol Multiphysics For Matlab – сервер для синхронізації даних Matlab та Comsol Multiphysics;

Matlab – використовується для розробки коду, який змінює значення геометричних параметрів моделі, обробляє отримані результати, виконує автоматичну синхронізацію геометрії Solid Works та Comsol Multiphysics при зміні геометричних параметрів у визначеному діапазоні;

Функціонування розробленої параметризованої моделі відбувається наступним чином:

Етап 1. Розробка 3D (2D)-моделі в САПР, наприклад, в середовищі Solid Works, з функціями параметризації (можливості зміни геометричних параметрів);

Етап 2. Задаються розміри та взаємозв'язки у розробленій моделі в САПР за допомогою глобальних змінних (Global Variables);

Етап 3. Розробляється зовнішній файл (наприклад, у форматі .txt) на який посилаються задані змінні в моделі САПР;

Етап 4. Синхронізація моделі Solid Works з Comsol Multiphysics за допомогою модуля Live Link With Solid Works та розробка польової математичної моделі для аналізу електромагнітного поля;

Етап 5. Запуск серверу Comsol Multiphysics For Matlab;

розробка коду синхронізації в середовищі Matlab для зміни файлів, запуску розрахунку та виведення результатів. За необхідності в системі Matlab проводиться обробка отриманих даних.

Згідно з рис. 2-5, розрахунок розробленої польової 3D або (2D)-моделі в Comsol Multiphysics здійснюється автоматично для різних конфігурацій геометрії моделі.

Наведена схема може змінюватися залежно від принципів побудови та параметризації моделі, мети розрахунку тощо.

На рис. 6 показано приклад параметризації ескізних розмірів для зубців магнітопровода статора.

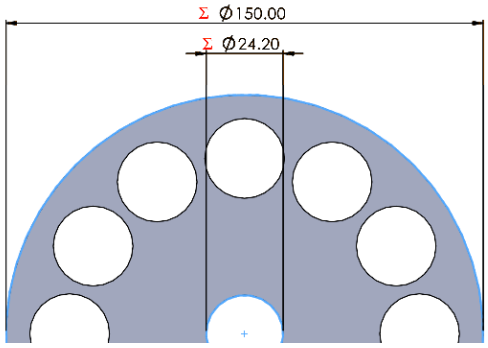

Рис. 6. Параметризація ескізних розмірів на прикладі зубців магнітопровода ротора ТМГПМ

По рис. 6 знак Σ означає прив'язку розміру до глобальних змінних (параметрів та основних розмірів генератора).Це можливо виконувати як для визначення розмірів між примітивами ескізу, так і для параметризації операцій моделювання (Boss-Extrude, Cut-Extrude тощо, в середовищі САПР). Одним із способів визначення глобальних змінних є використання інструменту Equations.

Параметризацію необхідно проводити на всіх етапах побудови окремої деталі, геометрію якої планується змінювати, та у кожній деталі збірок, якщо такі передбачені в конкретному випадку. Після визначення всіх змінних та прив'язування розмірів, виконується експорт даних у зовнішній файл (наприклад .txt) в якому відповідним чином задаються необхідні змінні, що відповідають за геометричні розміри досліджуваного об'єкта. Наприклад, зміст файлу, створений за допомогою операції експорту даних, за допомогою якого регулюється товщина спинки якоря, виглядає так, як показано на рис. 7.

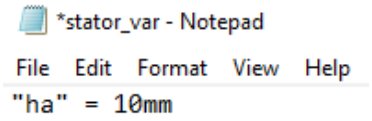

Рис. 7. Приклад файлу змінної для регулювання товщини спинки якоря

В файлі (на рис. 4) може задаватись як окрема змінна, так і масив змінних параметрів: параметри зубцевої зони статора та ротора, параметри магнітного осердя і таке інше.

Після параметризації моделі виконується її синхронізація зі середовищем Comsol Multiphysics за допомогою модуля Live Link For Solid Works. Використання даного модуля нівелює необхідність збереження конфігурацій 3D-моделі у вигляді окремих файлів з їх подальшим імпортом у Comsol Multiphysics.

Після формулювання задачі електромагнітного розрахунку в Comsol Multiphysics здійснюється запуск серверу Comsol Multiphysics With Matlab. У редакторі Matlab створюється скрипт для налаштування та запуску розрахунку, синхронізації файлів та перезапису змінних відповідно до заданого діапазону.

Команди для керування розрахунком через Matlab містяться у спільному з Comsol Multiphysics вікні, що викликається командою "mphnavigator" у командному вікні Matlab. Також, у вікні "mphnavigator" відображається дерево розрахунку, аналогічне тому, що у Comsol Multiphysics. Окрім цього, реалізація такого схемного рішення в Matlab дозволяє перегляд геометрії та результатів графічної інтерпретації результатів розрахунків.

Даний алгоритм можливо використовувати для оптимізації геометрії, розробки нових конструкцій та дослідження фізичних процесів в ЕМП різноманітної конфігурації. Відповідно до мети розрахунку, схема може спрощуватись.

На рис. 5 показано ескіз досліджуваного ТМГПМ, що використовується в якості прикладу в даній роботі.

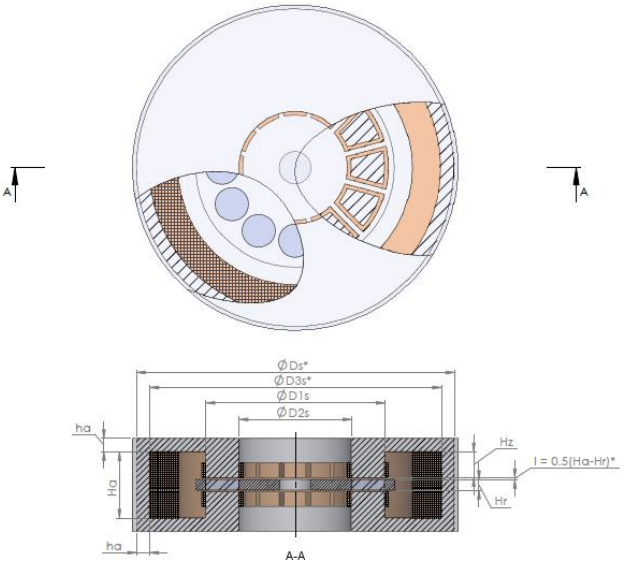

Рис. 8. Ескіз досліджуваного ТМГПМ параметризованими розмірами

Рис. 8 ілюструє параметризовані розміри, де знаком * позначено ті, що є залежними від змінних, значення яких варіювалося під час дослідження.

Результати моделювання. На рис. 9 показано розподіл електромагнітного поля в об'ємі досліджуваного генератора для його вихідних геометричних параметрів. Розподіл магнітної індукції зображено для фрагменту ТМГПМ з метою спрощення розробленої тривимірної полової математичної моделі. Картина розподілу поля показана для режиму неробочого ходу генератора.

Згідно із рис. 9 середнє значення магнітної індукції в зубцях статора складає ≈1,39 Тл, в ярмі статора ≈0,86 Тл, в повітряному проміжку ≈0,57 Тл та в спинці корпусу ≈0,5 Тл. Оскільки ротор виготовлений із немагнітного матеріалу, його геометричні параметри визначаються виходячи із оптимальної механічної міцності, жорсткості та потужності генератора.

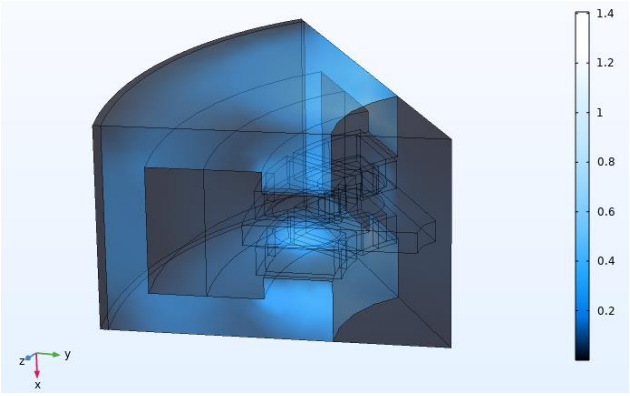

Рис. 9. Розподіл електромагнітного поля досліджуваного ТМГПМ, струм в підмагнічуючій обмотці Іп = 1 А.

Результати первинного розрахунку електромагнітного поля (рис. 6) показали, що розміри досліджуваного генератора є не оптимальними. Про це свідчать значення магнітної індукції, що є заниженими для обраної електротехнічної холоднокатаної сталі. Завищені розміри є причиною підвищення вартості конструкції, матеріалоємності, об'єму, встановлювальних розмірів і т.ін.

Оптимізації підлягають наступні геометричні параметри, згідно з рис. 8, досліджуваного ТМГПМ: ярмо статора, повітряний проміжок, зубцево-пазова зона статора, елементи корпусу.

На рис. 10 показано розподіл електромагнітного поля для оптимізованої конструкції досліджуваного ТМГПМ.

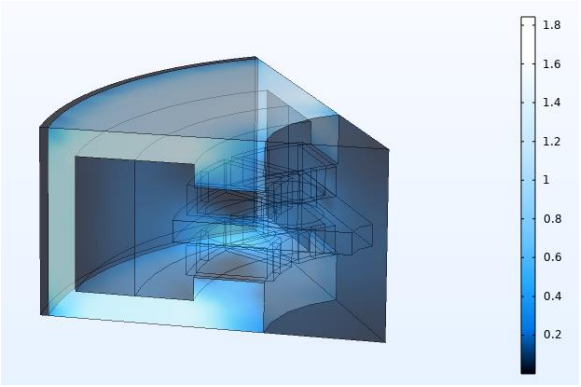

Рис. 10. розподіл магнітної індукції в оптимізованому варіанті ТМГПМ

В табл. 1 наведено порівняння значень магнітної індукції досліджуваного ТМГПМ до параметричної оптимізації та після.

Таблиця 1 – магнітна індукція в окремих ділянках досліджуваного ТМГПМ

Магнітна індукція в зоні	Значення параметру до оптимізації	Значення параметру після оптимізації
Повітряний проміжок	0.57 Тл	0.65 Тл
Ярмо магнітного осердя статора	0.76 Тл	1.45 Тл
Зубці статора	1.39 Тл	1.82 Тл
Корпус генератора	0.81 Тл	1.52 Тл

Кінець оптимізаційного розрахунку наступає в момент, коли значення магнітних індукцій в оптимізаційних зонах набувають заданої величини. Оптимізація товщини корпусу досліджуваного генератора проводилась при подачі струму на додаткову підмагнічуючу обмотку величиною I_3=1 А. Ця величина відповідає максимальній розрахунковій потужності підмагнічуючої обмотки. Величина повітряного проміжку оптимізувалась виходячи із міркувань максимально можливого значення електромагнітного моменту та мінімальних значень пульсацій та згинаючих осьових зусиль.

Наприклад, залежність величини магнітної індукції в поперечному перерізі зубця статора від його ширини (вираженої в кутах рис. 3) показано на рис. 11.

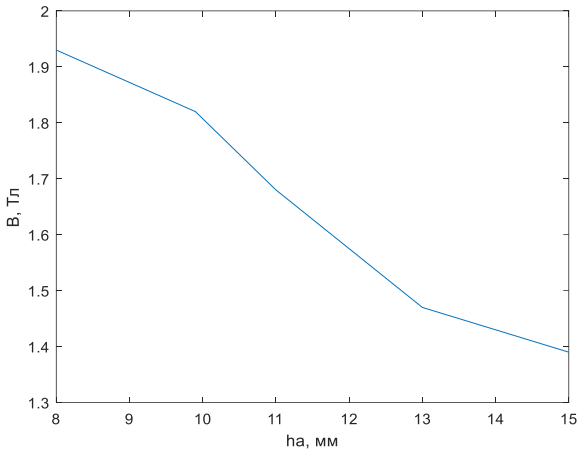

Рис. 11. Залежність магнітної індукції в зубці статора від його ширини

Виходячи з рис. 8, робоче значення індукції в зубцях лежить в межах 1.82…1.92 Тл. Використовуючи дану методологію параметричної оптимізації, аналогічно знаходяться оптимальні значення змінних dp, hp та hc.

В табл. 2 наведено повні результати розрахунку та параметричної оптимізації геометричних розмірів досліджуваного ТМГПМ.

Зниження об'єму конструкції генератора, його ваги та ціни досягається за рахунок зменшення ваги електротехнічної сталі після оптимізації. За результатами проведеної параметричної оптимізації можливо знизити вартість готової конструкції генератора на 18.1 %, вагу та об'єм магнітопровода на 33.1 %. Варто відмітити, що оптимізація параметрів обмотки якоря та додаткової обмотки підмагнічування в даній роботі не проводилась. Також не проводилась параметрична оптимізація форми та розмірів магнітів, оскільки для розробки даної конструкції генератора використовувались постійні магніти універсальної форми, що доступні на ринку.

Таблиця 2 – результати параметричної оптимізації геометричних параметрів ТМГПМ

Назва змінної	Призначення змінної	Початкове значення змінної	Значення змінної після оптимізації
δ	Величина повітряного проміжку	0.5 мм	1.5 мм
ha	Висота ярма якоря	15 мм	9.9 мм
dp	Регулювання півширини пазів (зубців)	3.1 мм	3.1 мм
hp	Регулювання висоти зубців (глибини пазів)	13 мм	11 мм
hc	Регулювання ширини корпусу	15 мм	9.9 мм
V	Об'єм магнітопровода	21.27·10–4 м3	16.1·10–4 м3
m	Розрахункова вага магнітопровода	16.59 кг	12.55 кг
C	Розрахункова вартість матеріалів конструкції	610 $	499 $

Висновки. Розроблено методологію для параметричної оптимізації геометричних параметрів ТМГПМ. Розроблений алгоритм за умови внесення певних модифікацій можливо використовувати для оптимізації чи розрахунку геометрії будь-якого електромеханічного перетворювача енергії.

В результаті параметричної оптимізації геометрії прототипу ТМГПМ та подвійним статором вдалося зменшити геометричні розміри за рахунок оптимізації величини магнітної індукції на окремих ділянках магнітного осердя досліджуваного генератора.

За рахунок застосування розробленого алгоритму вдалося досягти зменшення вартості, ваги та об'єму магнітопровода досліджуваного генератора на 18.1 %, 24.3% відповідно.

Розроблену методологію можливо використовувати для оптимізації геометрії, розробки нових конструкцій та дослідження фізичних процесів в електромеханічних перетворювачах енергії різноманітної конфігурації.

Список літератури

1 L. Video, M. Gabsi "Homopolar and bipolar hybrid excitation synchronous machines" Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2005), San Antonio, Texas (USA), May, 2005, pp. 1212-1218.

2 Nobuyula Naoe, "Trial production of a hybrid excitation type synchronous machine," Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2001), (France), 2001, pp. 545-547.

3 Sahib Khan. Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications [Електронний ресурс] / Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro // IEEE Access. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://ieeexplore.ieee.org/document/8918177.

4 Mehmet Recep Minaz. Design and Analysis of a new axial-flux coreless PMSG with three rotors and double stators [Електронний ресурс] / Mehmet Recep Minaz, Mehmet Celebi // Results in Physics 7. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/312273824_Design_and_analysis_of_a_new_axial_flux_coreless_PMSG_with_three_rotors_and_double_stators.

References (transliterated)

1 L. Video, M. Gabsi. Homopolar and bipolar hybrid excitation synchronous machines. Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2005), San Antonio, Texas(USA), May, 2005, pp. 1212-1218.

2 Nobuyula Naoe, "Trial production of a hybrid excitation type synchronous machine," Proc. of Int. Conf on Electric Machines and Drives (IEMDC2001), (France), 2001, pp. 545-547.

3 Sahib Khan, Syed Sabir Hussain Bukhari, Jong-Suk Ro Design and Analysis of a 4-kW Two-Stack Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed Applications [Електронний ресурс]. IEEE Access. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://ieeexplore.ieee.org/document/8918177.

4 Mehmet Recep Minaz, Mehmet Celebi Design and Analysis of a new axial-flux coreless PMSG with three rotors and double stators [Електронний ресурс]. Results in Physics 7. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/312273824_Design_and_analysis_of_a_new_axial_flux_coreless_PMSG_with_three_rotors_and_double_stators.

Надійшла (received) 30.04.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лихогуб Анна Павлівна (Лихогуб Анна Павловна, Anna Lykhohub) – випускниця кафедри електромеханіки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ; тел.:+380958220519; https://orcid.org/0000-0002-3380-0050; e-mail: anna.lykhohub@gmail.com.

Коваленко Михайло Анатолійович (Коваленко Михаил Анатольевич, Mykhaylo Kovalenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, тел.: (067) 656-36-51; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5602-2001; e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

Ткачук Ігор Валерійович (Ткачук Игорь Валерьевич, Tkachuk Igor) – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5717-2458; e-mail: baja0073@gmail.com.

Гончарук Антон Олександрович (Гончарук Антон Александрович, Anton Goncharyk) – магістр кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"; тел.:(097) 130-88-39; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0553-6931;e-mail: honcharukanton.sh@gmail.com.