

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ ПОЛЮСІВ СТАТОРА TFM В ГЕНЕРАТОРНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

А. В. Єгоров¹, А. М. Масленніков¹, О. О. Дунєв¹, Р. Ляйдхольд², М. Штаманн²

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

²Магдебурзький університет ім. Отто-фон-Геріке

Анотація. Представлена 3D модель TFM генератора і результати чисельно-польового розрахунку в програмі Ansys Maxwell, на базі яких створена методика розрахунку, яка дозволяє визначити оптимальну кількість витків котушки та полюсів на статорі. Отримано рівняння залежності індуктивності котушки й магнітної індукції в осерді статора від кількості полюсів статора, завдяки яким є змога провести аналітичний розрахунок.

Ключові слова: TFM, генератор, моделювання, індуктивність котушки, насичення, магнітна індукція, полюс.

Вступ

Вперше машину з поперечним магнітним потоком (Transversal flux machine – TFM) запропонував В. М. Морді ще 1895 року. Але, на жаль, на той момент були відсутні можливості автоматизованого проектування і виробництва. Проте, в останні десятиліття у зв'язку з розвитком моделювання на основі чисельних методів, а також сучасних технологій у виробництві, TFM стали набувати все більшого значення. Нині декілька науково-дослідних груп активно займаються питаннями проектування і виробництва цього типу машин. Ці роботи показали високий потенціал TFM з точки зору енергетичних показників при високому питомому обертовому моменті та хороших вагових та габаритних показниках [1–6]. Окрім цього TFM дозволяє реалізувати багатополосну конструкцію (20–60 полюсів), що відкриває шлях до створення тихохідних високомоментних безредукторних електричних машин. Цей тип машин дозволяє застосувати найпростіші, економічні і надійні на сьогодні обмотки статора. Такі машини можуть працювати в режимі двигуна та генератора [7, 8].

Незважаючи на ці переваги, лише декілька компаній освоюють виробництво TFM. Ризики, що пов'язані з впровадженням нових виробничих технологій і зростання виробничих витрат зупиняє багато компаній від впровадження у виробництво цих машин.

Вдосконалення TFM дозволить знизити витрати матеріалів постійних магнітів, поліпшити вагові та габаритні показники, що дозволить його використовувати в якості генераторів на вітроустановки.

1. Об'єкт дослідження

В якості базової моделі дослідження взята експериментальна модель низькообертового генератора з поперечним магнітним потоком з дисковою конструкцією ротора, яка розроблена і спроектована співробітниками кафедри «Електричні машини» НТУ «ХПІ» спільно з Магдебурзьким університетом імені Отто-фон-Геріке (рис. 1) [9].

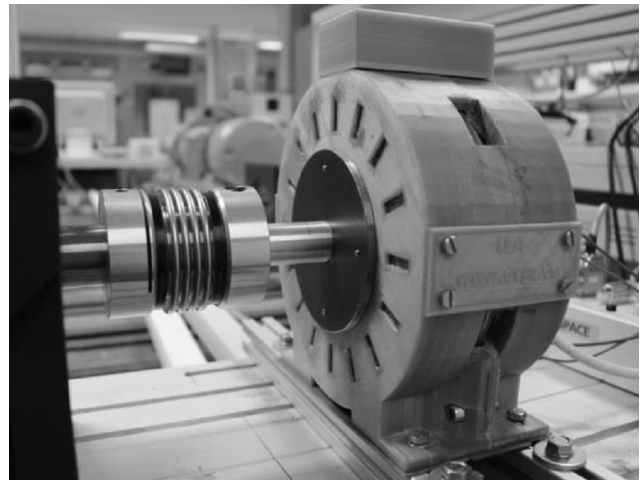


Рис. 1. Експериментальний робочий прототип генератора TFM з дисковим ротором

Дана експериментальна модель розрахована на частоту обертання $n = 20$ об/хв і має наступні розміри: зовнішній діаметр осердя статора $d_{se} = 0,176$ м, активна довжина $l_a = 0,09$ м, повітряний проміжок $\delta = 1$ мм, кількість полюсів $2p = 16$. В результаті експериментального дослідження отримано осцилограму ЕРС, що наводиться в обмотках статора (рис. 2).

Як видно з осцилограми, максимальне значення ЕРС становить близько 33 В.

© Єгоров А. В., Масленніков А. М., Дунєв О. О.,
Ляйдхольд Р., Штаманн М., 2017

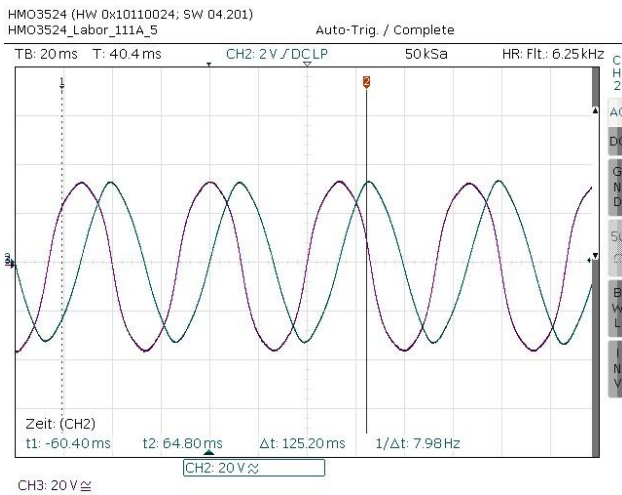
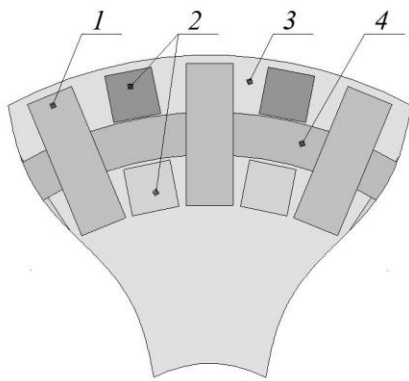
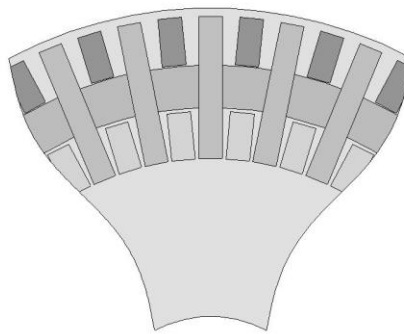


Рис. 2. ЕРС, що наводиться в обмотках статора

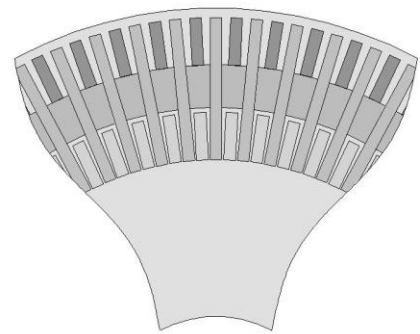
Одним із способів підвищення енергетичних показників TFM в генераторному режимі роботи є збільшення частоти перемагнічування f осердя статора. Як впливає з закону електромагнітної індукції, це призведе до підвищення ЕРС, що наводиться, і, як наслідок, підвищення корисної



а)



б)



в)

1 – осердя полюса; 2 – постійний магніт; 3 – осердя ротора; 4 – котушка.

Рис. 3. Ескізи магнітної системи TFM з 16 (а), 32 (б) та 64 (в) полюсами

2. Тривимірне моделювання

На даний час для моделювання електромагнітних процесів в електричних машинах найбільшу популярність отримала програма Ansys Maxwell завдяки простоті інтерфейсу і адекватності результатів, одержуваних у результаті моделювання. Особливістю пакету Ansys Maxwell, в порівнянні з аналогічними програмами, є можливість проводити моделювання на тривимірних моделях, що дозволяє врахувати конструктивні особливості кожної машини [10].

Розробка тривимірних моделей виконано в програмі Аскон Компас-3d, а в програмі Ansys Maxwell вже розраховано моделі TFM в генераторному режимі роботи з кількістю полюсів від 16 до 64 з кроком 8 полюсів. Отримано розподіл магнітного поля в осердях статора і ротора, а

потужності і ККД. Виходячи з того, що TFM це синхронна машина, то

$$f = \frac{p \cdot n}{60}. \quad (1)$$

Можливо два шляхи вирішення: перший – збільшення частоти обертання n ротора і другий – збільшення кількості полюсів p . Одночасно зміниться і кутова частота ω , пов'язана з частотою f співвідношенням

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (2)$$

Перший варіант не прийнятний, тому що однією з умов створення тихохідного генератора є обмеження його частоти обертання на рівні 20 об/хв.

У розглянутій конструкції TFM збільшення кількості полюсів можливо тільки з одночасним зменшенням їх ширини. Це пов'язано з тим, що зовнішній діаметр статора необхідно залишити величиною постійною (рис. 3).

також графіки ЕРС, що наводяться в обмотках статора. Значення кожної ЕРС змінюється за синусоїдальним законом, а для 16-ти полюсної конструкції максимальне значення ЕРС становить 31 В (рис. 4).

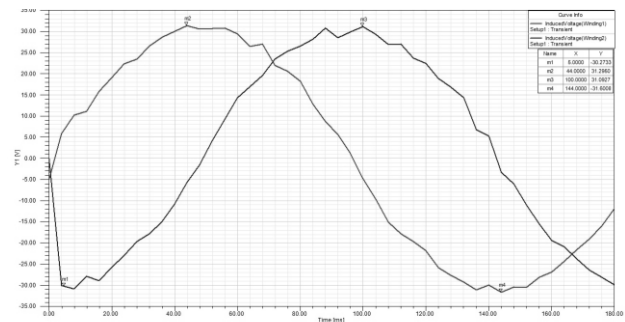


Рис. 4. Розрахована в програмі Maxwell ЕРС, що наводиться в обмотках статора

Таким чином, можна зробити висновок, що чисельний розрахунок має досить високу міру збіжності і лежить в межах інженерних погрешностей.

Моделювання електромагнітних процесів, для кожного з варіантів конструкції, показало, що зменшення ширини полюса, а відповідно і ширини постійного магніту, призводить до знач-

ного зменшення насичення самого полюса (рис. 5). Це пов'язано з тим, що запасена енергія в магніті зменшується пропорційно зменшенню об'єму самого магніту, а величина повітряного проміжку і довжина шляху замикання силової лінії магнітного потоку залишається величиною постійною.

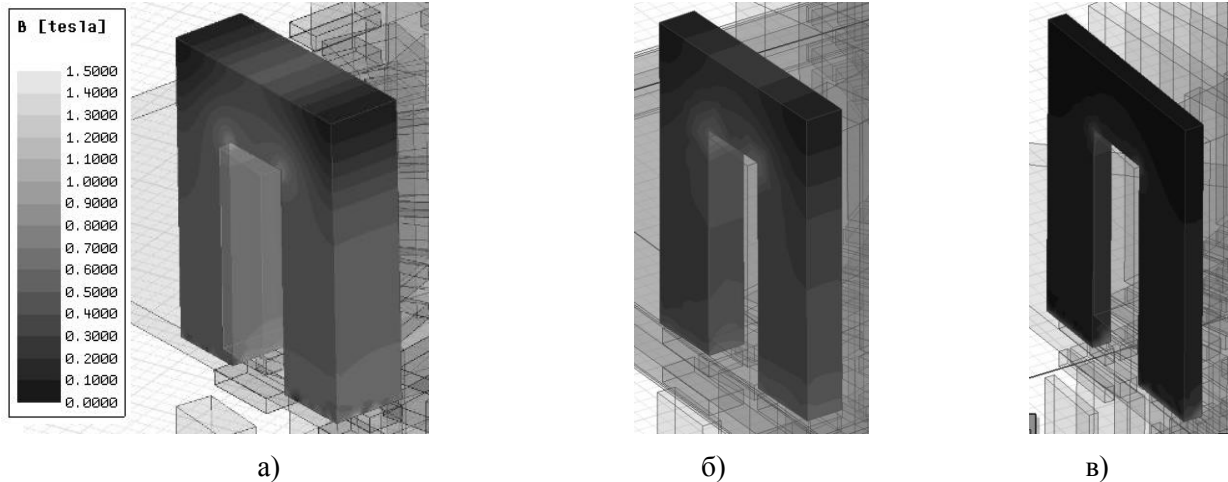


Рис. 5. Картина насичення магнітопроводу статора TFM з 16 (а), 32 (б) та 64 (в) полюсами

Після проведення електромагнітного розрахунку програма Ansys Maxwell дозволяє отримати не тільки розподіл значень магнітної індукції в кожній точці тривимірної моделі, але і розрахувати індуктивність самої котушки. Це є позитивною рисою даної програми, оскільки аналітичний розрахунок індуктивності котушки розміщеної в пазах полюсів різного розміру і кількості є непростою задачею.

Моделювання показало, що одночасно зі зменшенням насичення осердь статора відбувається збільшення індуктивності котушки (рис. 6). Даний факт негативно позначається на параметрах самої котушки, а саме на її індуктивному опорі.

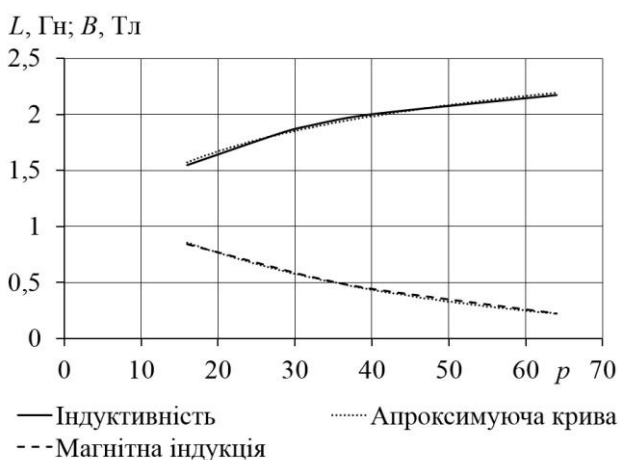


Рис. 6. Залежність індуктивності котушки і магнітної індукції в осерді статора TFM від кількості полюсів статора

3. Розробка методики розрахунку

Знаючи форму кривих індуктивності котушки і магнітної індукції можна підібрати рівняння, які будуть описувати дані криві.

Апроксимація графіка середнього значення магнітної індукції в осерді статора TFM при їх різній кількості

$$B = 1,34 \cdot e^{-0,028 \cdot p}. \quad (3)$$

Одночасно зі зміною значення магнітної індукції відбувається зміна величини магнітного потоку

$$\Phi = B \cdot S_p. \quad (4)$$

де S_p – площа поперечного перерізу полюса.

В даному варіанті TFM, площа поперечного перерізу полюса дорівнює площі постійного магніту

$$S_p = S_{pm}, \quad (5)$$

яку, в свою чергу, можна знайти виходячи з геометричних параметрів генератора

$$S_{pm} = \frac{\pi \cdot k_{pm} \cdot ((d_s + b_i)^2 - d_s^2)}{4 \cdot p}, \quad (6)$$

де: k_{pm} – коефіцієнт заповнення осердя ротора постійними магнітами, $k_{pm} = 0,84$.

d_s – внутрішній діаметр осердя статора, мм;

b_i – висота постійного магніту, мм.

Таким чином, підставляючи формули (3), (5), (6) до формули (4) отримано рівняння магнітного потоку в осерді статора TFM

$$\Phi = \frac{1,34 \cdot \pi \cdot k_{pm} \cdot ((d_s + b_i)^2 - d_s^2)}{4 \cdot p} \cdot e^{-0,028p}. \quad (7)$$

Апроксимація графіка індуктивності котушки від кількості полюсів статора описується наступним рівнянням

$$L = 0,45 \cdot \ln(p) + 0,32. \quad (8)$$

Цей вираз вірний тільки для кількості витків рівним 1000. Для можливості знаходження індуктивності котушки при іншій кількості витків необхідно формулу (7) доповнити коефіцієнтом

$$k_w = \left(\frac{W}{1000} \right)^2, \quad (9)$$

де W – кількість витків в котушці статора.

Таким чином, підставивши коефіцієнт (9) до формули (8) отримано рівняння зміни індуктивності котушки статора у TFM:

$$L = (0,45 \cdot \ln(p) + 0,32) \cdot \left(\frac{W}{1000} \right)^2. \quad (10)$$

Зі збільшенням кількості полюсів збільшується частота перемагнічування, тому індуктивним опором котушки нехтувати не можна

$$X_G = \omega \cdot L. \quad (11)$$

Таким чином, підставивши формули (1), (2), (10) в формулу (11) отримано вираз для знаходження індуктивного опору котушки в TFM

$$X_G = \frac{\pi \cdot p \cdot n \cdot W^2}{30} \cdot (0,45 \cdot \ln(p) + 0,32) \cdot 10^{-6}. \quad (12)$$

Недоліком TFM є великий активний опір його котушки, який зв'язаний з великою кількістю витків

$$R_G = \rho \cdot \frac{\pi \cdot (d_s + 2 \cdot (b_i + 0,5h_w)) \cdot W^2}{b_w \cdot h_w \cdot k_w}, \quad (13)$$

де: ρ – питомий опір міді;

h_w, b_w – висота і ширина котушки;

k_w – коефіцієнт заповнення паза.

Знаючи активну і реактивну складову опорів, знайдемо повний опір котушки

$$Z_G = \sqrt{R_G^2 + X_G^2}. \quad (14)$$

Таким чином, підставивши формули (12) і (13) в формулу (14) отримано вираз для знахо-

дження повного опору котушки в TFM з урахуванням геометрії і повітряним проміжком 1 мм:

$$Z_G = \sqrt{\left(\rho \cdot \frac{\pi \cdot (d_s + 2 \cdot (b_i + 0,5h_w)) \cdot W^2}{b_w \cdot h_w \cdot k_w} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot p \cdot n \cdot W^2}{30} \cdot (0,45 \cdot \ln(p) + 0,32) \cdot 10^{-6} \right)^2}. \quad (15)$$

При вирішенні прикладних задач за мету ставиться не знаходження величини та розподілу магнітної індукції по осердю, а величина напруги, яка залежить від величини ЕРС в котушці генератора і опору навантаження (рис. 7).

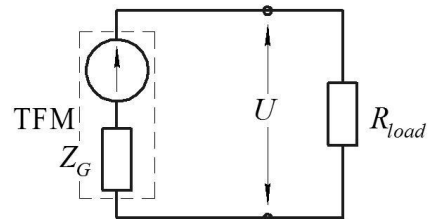


Рис. 7. Принципова електрична схема включення навантаження до генератора

Згідно зі схемою на рис. 7, рівняння падіння напруги має вид

$$U = E - I \cdot Z_G. \quad (16)$$

Значення ЕРС, що наводиться в котушці TFM, складається з суми ЕРС створюваних кожним полюсом

$$E = \sum_0^{2p} E_p. \quad (17)$$

У свою чергу ЕРС від одного полюса визначається виразом

$$E_p = 4,44 \cdot \Phi \cdot W \cdot f. \quad (18)$$

Підставляючи знайдені раніше вирази (1), (7) і (18) в формулу (17), отримаємо рівняння ЕРС в котушці TFM

$$E = 0,025 \cdot \pi \cdot k_{pm} \cdot p \cdot n \cdot W \times \left((d_s + b_i)^2 - d_s^2 \right) \cdot e^{-0,028p}. \quad (19)$$

Як видно з рівняння, залежність $E(p)$ має нелінійний характер. Якщо підставити до цього рівняння геометричні розміри 16-ти полюсного TFM генератора, можна побудувати залежність ЕРС від кількості полюсів і знайти при якій полюсності настане максимум ЕРС. Водночас можна оперувати двома величинами: кількістю полюсів і кількістю витків в котушці статора (рис. 8).

Використовуючи програму Ansys Maxwell можна отримати залежність значень ЕРС в котушці в залежності від кількості полюсів статора. Дана залежність показана на рис. 8 лінією із крапок ($W=1000$, Maxwell).

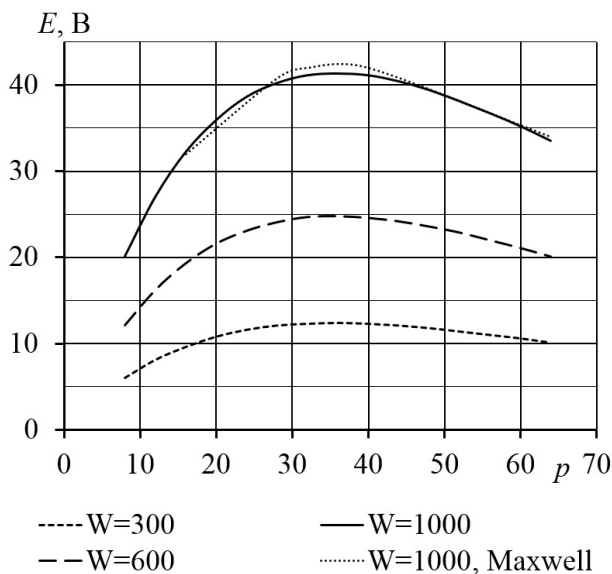


Рис. 8. Залежність ЕРС від числа полюсів статора

Аналізуючи рис. 8 можна зробити висновок, що:

- аналітичний розрахунок показав досить високу точність отриманих результатів у порівнянні з даними отриманими з розрахунку в програмі Ansys Maxwell;

- максимальне значення наводиться в котушці ЕРС доводиться на кількість полюсів статора TFM знаходиться в діапазоні від 32 до 38. Причому дана тенденція дотримується і при інших кількостях витків обмотки.

З технологічних міркувань легше виготовити конструкцію генератора з меншою кількістю полюсів на статорі, тому оптимальною вважається модель з 32 полюсами на статорі, тому що подальше збільшення полюсності не призводить до збільшення ЕРС в котушках статора.

Для знаходження залежності напруги TFM генератора від струму навантаження підставимо вирази (15) і (19) в рівняння (16):

$$U = 0,025 \cdot \pi \cdot k_{pm} \cdot p \cdot n \cdot W \cdot \left((d_s + b_i)^2 - d_s^2 \right) \times \\ \times e^{-0,028p} - I \cdot \sqrt{\left(\rho \cdot \frac{\pi \cdot (d_s + 2 \cdot (b_i + 0,5h_w)) \cdot W^2}{b_w \cdot h_w \cdot k_w} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot p \cdot n \cdot W^2}{30 \cdot ((0,45 \cdot \ln(p) + 0,32) \cdot 10^{-6})} \right)^2}$$

Таким чином, отримано сімейство навантажувальних характеристик при різному значенні кількості витків в котушці статора і для двох видів TFM генераторів: з 16 і 32 полюсами на статорі (рис. 9). Даний вибір аргументований тим, що TFM генератор з 16 полюсами є першим прототипом, що було створено для експериментальних досліджень та проведено порівняння результатів математичного моделювання. Експериментальні результати представлено навантажувальною характеристикою, а TFM з 32 полюсами – модель з найкращими показниками.

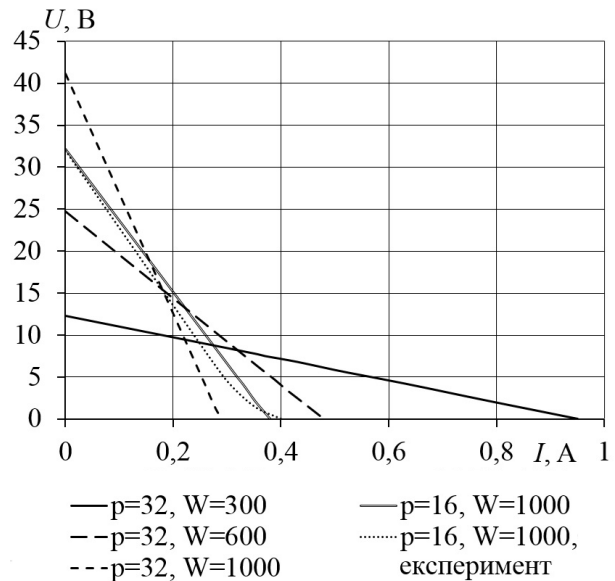


Рис. 9. Навантажувальна характеристика TFM

Як видно з рис. 9, експериментальні дані мають незначну похибку з розрахунковими для генератора із 16 полюсами. Виходячи з характеру навантажувальної характеристики, найкращі показники має характеристика, яка відповідає 32 полюсам на статорі і 300 виткам у котушці.

Висновки

1. Створено методику розрахунку навантажувальної характеристики TFM генератора, яка показала, що оптимальна кількість полюсів на статорі становить 32 шт, а кількість витків в котушці повинна знаходитися в діапазоні від 100 до 300. Жорсткість зовнішньої характеристики визначається навантаженням генератора, потребами споживача та умовами спільної роботи з напівпровідниковим перетворювачем.

2. Отримано рівняння залежності індуктивності котушки та магнітної індукції в осерді статора від кількості полюсів статора, завдяки яким є змога провести аналітичний розрахунок TFM генератора, що суттєво зменшує час проектування генератора з необхідними параметрами.

3. TFM – це специфічні машини не класичного конструктивного виконання, проте за рахунок своїх особливостей роботи, управління, надійності і простоти виготовлення, набули широкого інтересу у дослідженнях у Європі та США.

Список використаної літератури

1. Weh, H. Transversalflußmaschine / H. Weh [Text]. – In: Schröder D., Elektrische Antriebe – Grundlagen, Springer, 2007.
2. Jiang, J. Analytische und dreidimensionale numerische Berechnung von Transversalflussmaschinen / J. Jiang [Text]. – Braunschweig, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau u. Elektrotechnik, Diss., 1988.
3. Svehkarenko, D., Cosic, A., Soulard, J., Sadarangai, C. Transverse flux machines for sustainable development – road transportation and power generation / D. Svehkarenko, etc. [Text]. – PEDS 2007, 1108–1114, 2007.
4. Werner, U., Raffel, H., Orlik, B. Transversalflussgeneratoren mit hoher Leistungsdichte in Multi-Megawatt-Windenergieanlagen / U. Werner, etc. [Text]. – Wissenschaftsforum, Messe HUSUMBTIND, September 2005.
5. Deokje Bang. Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines, 2010 / Deokje Bang. [Electrical resours]. – Access Mode: <https://goo.gl/wSCbSd>.
6. Vinogradski, M., Werner, U., Schüttler, J., Petter, T., Orlik, B. Generation of optimized current wave forms for the production of minimized cogging torque of transverse flux motors for direct drive applications / M. Vinogradski etc. [Text]. – 11th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), 2004, Riga/Latvia.
7. Палис, Ф., Штаман, М., Кишнер, Ю. и др. Двигатель с поперечным магнитным полем – компьютерные и экспериментальные исследования / Ф. Палис, М. Штаман, Ю. Кишнер и др. [Текст]. – Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 36 (1009). – С. 287–290.
8. Любарский, Б. Г. и др. Упрощенная математическая модель магнитного поля двигателя с поперечным полем / Б. Г. Любарский [Текст]. – Светотехника и электроэнергетика. – 2008. – № 2. – С. 75–78.
9. Тези доповідей 24-ї Міжнародної наук.-практичної конференції «Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2016), 18-20 травня 2016 р. [Текст]. – ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ «ХПИ».
10. Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide. [Text]. / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 1006 p.

References

1. Weh, H. (2007), Transversalflußmaschine. In: Schröder D., Elektrische Antriebe – Grundlagen, Springer.
2. Jiang, J. (1988), Analytische und dreidimensionale numerische Berechnung von Transversalflussmaschinen, Braunschweig, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau u. Elektrotechnik, Diss.
3. Svehkarenko, D., Cosic, A., Soulard, J., Sadarangai, C. (2007), Transverse flux machines for sustainable development – road transportation and power generation, PEDS, 1108–1114.
4. Werner, U., Raffel, H., Orlik, B. (2005), Transversalflussgeneratoren mit hoher Leistungsdichte in Multi-Megawatt-Windenergieanlagen, Wissenschaftsforum, Messe HUSUMBTIND.
5. Deokje Bang (2010), Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines.
6. Vinogradski, M., Werner, U., Schüttler, J., Petter, T., Orlik, B (2004), Generation of optimized current wave forms for the production of minimized cogging torque of transverse flux motors for direct drive applications. 11th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), Riga/Latvia.
7. Palis, F., Stamann, M., Kirshner, J., etc. (2013), The motor with a transverse magnetic field - computer and experimental research [Dvigatel s poperechnym magnitnym polem – kompyuternyye i eksperimentalnyye issledovaniya], Journal of Nat. Tech. Un-ty "KhPI": Sat. Sci. Tr. Subject. Issue. : Problems of automated electric drive. - Kharkov: NTU "KhPI". – No. 36 (1009). – P. 287–290.
8. Lyubarsky, B.G., and etc. (2008), Simplified mathematical model of the magnetic field of the motor with a transverse field [Uproschennaya matematicheskaya model magnitnogo polya dvigatelya s poperechnym polem], Light engineering and electric power engineering. – No. 2. – P. 75–78.
9. Thesis of the reports 24-th Intern. Scien. and practical Conf. "Information Technologies: Science, Technics, Technology, Education, Health" [Tezisy dokladov 24-ya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konf. «Informatsionnyye tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, obrazovanie, zdorovohranenie»], (MicroCAD-2016), 18–20 of May in 2016. / Ed. E. I. Sokol. – Kharkiv: NTU "KhPI".
10. Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 1006 p.

FINDING THE OPTIMAL NUMBER OF TFM STATOR POLES IN GENERATOR MODE

A. V. Yehorov¹, A. M. Masliennikov¹, O.O. Duniev¹, R. Leidhold², M. Stamann²

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

²Otto-von-Guericke University Magdeburg

Abstract. The TFM model of generator was designed and calculated using numerical-field method in the program Ansys Maxwell. The results of these calculations was given in this article and analyzed, which allowed to find the optimum number of the coil turns and the optimum number of the stator poles with the highest machine efficiency and useful output power. **Purpose.** Plot an external characteristic of the TFM generator for a different number of turns and find the most optimal configuration of the stator core with the most effective number of poles. **Methodology.** Modeling of electro-magnetic processes in TFM with generator mode and analytical comparison of these results with experimental data. **Results.** The equation of dependence of the coil inductance and magnetic induction in the stator core on the number of stator poles is obtained. Also due to this dependence we got the possible to perform the future analytical calculations. **Originality.** TFM - is a specific synchronous electrical machine with a non-classic constructive design, but due to their work features, reliability, simplicity of control and manufacture, they have been receiving a wide interest in a modern research works. **Practical value.** A 3D model design of the TFM with the disk type of rotor was presented, and the results of its experimental research was shown, which help to revealed the dependence of the number of stator poles on the generated EMF in generator mode. A common equation of EMF was also obtained, which allows to predict the EMF values in the stator coil of TFM generator with a different numbers of turns and poles, which will allow to design the TFM machines with a high accuracy in the future.

Keywords: TFM, generator, simulation, coil inductance, saturation, magnetic induction, pole.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ПОЛЮСОВ СТАТОРА TFM В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

А. В. Егоров¹, А. М. Масленников¹, А. А. Дунев¹, Р. Ляйдхольд², М. Штаманн²

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

²Магдебургский университет им. Отто-Фон-Герике

Аннотация. Представлена 3D модель TFM генератора и результаты численно-полевого расчета в программе Ansys Maxwell на базе которых создана методика расчета, позволяющая определить оптимальное количество витков катушки и полюсов на статоре. Получено уравнение зависимости индуктивности катушки и магнитной индукции в сердечнике статора от количества полюсов статора, благодаря которым есть возможность провести аналитический расчет.

Ключевые слова: TFM, генератор, моделирование, индуктивность катушки, насыщение, магнитная индукция, полюс.

Отримано 14.04.2017



Єгоров Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна,
E-mail: toe@mail.ru, тел. +38 - 057 - 707 - 65 - 14.

Andrii Yehorov, Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Electrical machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Kyrpychova str., 2, Kharkiv, Ukraine.

ORCID ID: 0000-0001-6643-4256



Маслєнніков Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, E-mail: x-maslennikov@yandex.ua, тел. +38-057-707-65-14

Andrii Masliennikov, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Курпичова str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-1174-0322



Дунєв Олексій Олександрович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, E-mail: duniev_khpi@mail.ru, тел. +38-057-707-65-14

Aleksei Duniev, Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Electrical machines, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Курпичова str., 2, Kharkiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-8196-7077



Роберто Ляйдхольд, доктор технічних наук, професор, професор кафедри систем електричного приводу в Магдебурзькому університеті ім. Отто-фон-Геріке. Universitätsplatz 2, Магдебург, Німеччина, E-mail: roberto.leidhold@ovgu.de, тел. +49-391-67-18595

Roberto Leidhold, Prof. Dr.-Ing., Professor of Electrical Drive Systems, Institute of Electric Power Systems, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Universitätsplatz 2, Magdeburg, Germany

ORCID ID: 0000-0001-7810-3761



Маріо Штамманн, докторант, науковий співробітник кафедри систем електричного приводу в Магдебурзькому університеті ім. Отто-фон-Геріке. Universitätsplatz 2, Магдебург, Німеччина, E-mail: mario.stamann@ovgu.de, тел. +49-391-67-18679

Mario Stamann, Dipl.-Ing. Mario Stamann, Doctoral Candidate and Research Associate, Chair of Electrical Drive Systems, Institute of Electric Power Systems, Otto von Guericke University Magdeburg, Universitätsplatz 2, Magdeburg, Germany

ORCID ID: 0000-0002-5613-3537