

І. Р. Гавдьо

Національний університет “Львівська політехніка”
Кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем
Ihor.r.havdo@lpnu.ua

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

<http://doi.org/10.23939/>

© Гавдьо І.Р., 2023

На даний час двигуни постійного струму зі збудженням від постійних магнітів (ДПС ПМ) широко застосовуються в транспортних засобах, побутових приладах, переносному електроінструменті внаслідок простої конструкції та невеликої вартості. Тому завдання створення математичних моделей їх розрахунку, які можна застосувати для проектування, є актуальним. Метою статті є уточнення математичної моделі магнітного стану ДПС ПМ та дослідна перевірка відповідності результатів експерименту результатам розрахунку. Для опису магнітного стану ДПС ПМ використана теорія магнітних та електричних кіл. Запропонована уточнена розгалужена заступна схема магнітопроводу ДПС ПМ з зосередженими параметрами. У цій схемі немагнітним ділянкам магнітопроводу відповідають постійні магнітні опори. Ділянкам магнітопроводу з феромагнітних матеріалів відповідають нелінійні магнітні опори, які представлені залежністю $F[\Phi]$ спаду намагнічуючої сили на магнітному опорі від магнітного потоку. Зубцева зона якоря, розміщена під магнітами, розбивається на m однакових секторів радіальними площинами, перпендикулярними до площини листів якоря. Заступна схема магнітопроводу описана системою нелінійних рівнянь, складених для однієї полюсної поділки двигуна з використанням методу контурних струмів. Ця система містить три рівняння контурів статора та $(m - 1)$ рівнянь для контурів якоря. Наведені результати розрахунку потоку магніту та індукцій у різних ділянках магнітопроводу ДПС ПМ. Адекватність розрахунку магнітного кола ДПС ПМ перевірена стосовно потоку магніту. Дослідний взірець ДПС ПМ складається зі статора та необмотаного якоря. В діаметральних пазах якоря, заповнених діелектриком, намотана вимірювальна котушка, витки якої розташовані біля повітряного проміжку. Виводи вимірювальної котушки приєднані до флюксметра. Фіксувалося відхилення стрілки флюксметра під час обертання якоря від положення котушки, яке відповідає геометричній нейтралі, до її положення, що збігається з віссю полюсів. Розрахункове та дослідне значення потоку магніту збігаються з точністю 0,86%, що підтверджує адекватність запропонованої математичної моделі магнітного стану ДПС ПМ. Запропонована заступна схема магнітопроводу та система рівнянь, що її описують, можуть бути базою для створення математичних моделей розрахунку статичних характеристик та перехідних режимів ДПС ПМ.

Ключові слова: колекторний двигун постійного струму, постійний магніт, заступна схема, система нелінійних рівнянь, експериментальна перевірка.

Постановка проблеми

На даний час в колекторних мікродвигунах постійного струму переважно застосовується збудження від постійних магнітів, яке має низку переваг перед електромагнітним збудженням: вищий ККД через відсутність втрат на збудження, простіша конструкція та технологія виготовлення, менші габарити. В фундаментальній праці про електричні машини з постійними магнітами [1]

наведені дані про широке застосування ДПС ПМ: транспортні засоби, іграшки, електропобутові прилади, переносний електроінструмент. В деяких випадках колекторні ДПС ПМ можуть бути замінені безщітковими двигунами постійного струму. Однак, для приладів побутової техніки, іграшок та ручного електроінструменту, де визначальним чинником є вартість, можна передбачити у перспективі успішне застосування ДПС ПМ.

Актуальність дослідження

Актуальність дослідження обумовлена важливістю створення математичних моделей ДПС ПМ, які можна застосувати під час проектування нових та оптимізації існуючих взірців цього двигуна.

Формулювання мети та завдань статті

Метою статті є уточнення математичної моделі магнітного стану ДПС ПМ та її експериментальна перевірка. Ця модель дає змогу за параметрами магніту та геометричними даними магнітопроводу розрахувати магнітні потоки та індукції на всіх ділянках магнітного кола.

Завданнями статті є уточнення заступної схеми магнітопроводу ДПС ПМ, опис її відповідною системою нелінійних рівнянь, складання комп'ютерної програми та проведення розрахунків, експериментальна перевірка адекватності математичної моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В [2] для дискового ДПС ПМ запропонована спрощена лінійна модель, яка дає змогу отримати аналітичні вирази для попереднього розрахунку габаритних розмірів двигуна, що є важливим для інженерної практики. Стійкість до перевантажень за струмом ДПС ПМ, що використовуються як автомобільні стартери, проаналізовано в [3]. Розрахунки проведені на основі поєднання колових та польових методів. В [4] розглянуто двигун постійного струму середньої потужності з гібридною системою збудження, яка є поєднанням збудження від постійних магнітів та електромагнітного збудження. Дослідження проводилося методом математичного моделювання магнітного поля з використанням методу скінченних елементів. Шляхи підвищення обертового моменту вбудованого моментного двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів наведені у [5]; використані аналітичні та розрахункові методи.

Аналітичні методи [2, 5] вимагають прийняття спрощуючих допущень, однак дають змогу отримати розрахункові співвідношення, які безпосередньо можуть застосовуватися для інженерної практики. Методи дослідження на основі рівнянь поля [1, 3, 4] є найбільш точними, однак трудомісткими. Для опису магнітного стану асинхронного двигуна з екранованими полюсами в [6] запропонована розгалужена заступна схема магнітопроводу. Ця схема дає змогу достатньо адекватно розрахувати усталені режими та перехідні процеси двигуна [7]. Математичні моделі ДПС ПМ на основі деталізованої заступної схеми магнітопроводу запропоновані в [8, 9]. Використання методів розрахунку на основі магнітних та електричних кіл, на наш погляд, дає змогу досягти достатньої для інженерних розрахунків точності розрахунків, і є менш трудомістким у порівнянні з методами поля.

Виклад основного матеріалу

Для розрахунку магнітного стану ДПС ПМ використаємо розгалужену заступну схему магнітопроводу з зосередженими параметрами, яка є уточненням схеми, наведеної в [9]. У цій схемі немагнітним ділянкам (повітряний проміжок та ділянка проходження потоку розсіяння з бічної сторони магніту до ярма статора) відповідають постійні магнітні опори. Феромагнітним ділянкам відповідають нелінійні магнітні опори, представлені залежностями спаду МРС від магнітного потоку F [Φ]. Прийmemo допущення, викладені у [8].

Враховуючи умови симетрії, розглянемо структуру заступної схеми, яка відповідає одній полюсній поділці. Зубцеву зону якоря, розміщену під магнітами, розбиваємо на m однакових секторів площинами, перпендикулярними до площини листів якоря. Заступна схема магнітопроводу ДПС ПМ

для випадку $m = 5$ наведена на рис. 1. На схемі якір двигуна представляється радіальними гілками, сполученими паралельно. Кожна з гілок містить постійний опір повітряного проміжку $R_{\delta i}$, намагнічуючу силу i -го сектора T_j обмотки якоря та нелінійний магнітний опір зубцевої зони R_{zj} , представлений залежністю $F_{zj} [\Phi_{\delta i}]$ ($i = 1 \dots m$). Між цими гілками розташовані нелінійні магнітні опори ділянок ярма якоря R_{arj} , представлені залежністю $F_{arj} [\Phi_{arj}]$ ($j = 1, \dots, m - 1$). Нелінійний магнітний опір R_{ar} , представлений залежністю $F_{ar} [\Phi_{ar}]$, відповідає ділянці ярма якоря, розташований у просторі між магнітами. Ділянки ярма статора, розташовані між магнітами, відповідає нелінійний магнітний опір R_{s1} , представлений залежністю $F_{s1} [\Phi_{s1}]$. Нелінійні магнітні опори R_{s2}, R_{s3} , представлені залежностями $F_{s2} [\Phi_{s2}], F_{s3} [\Phi_{s3}]$, відповідають ділянкам ярма статора, які прилягають до магніту.

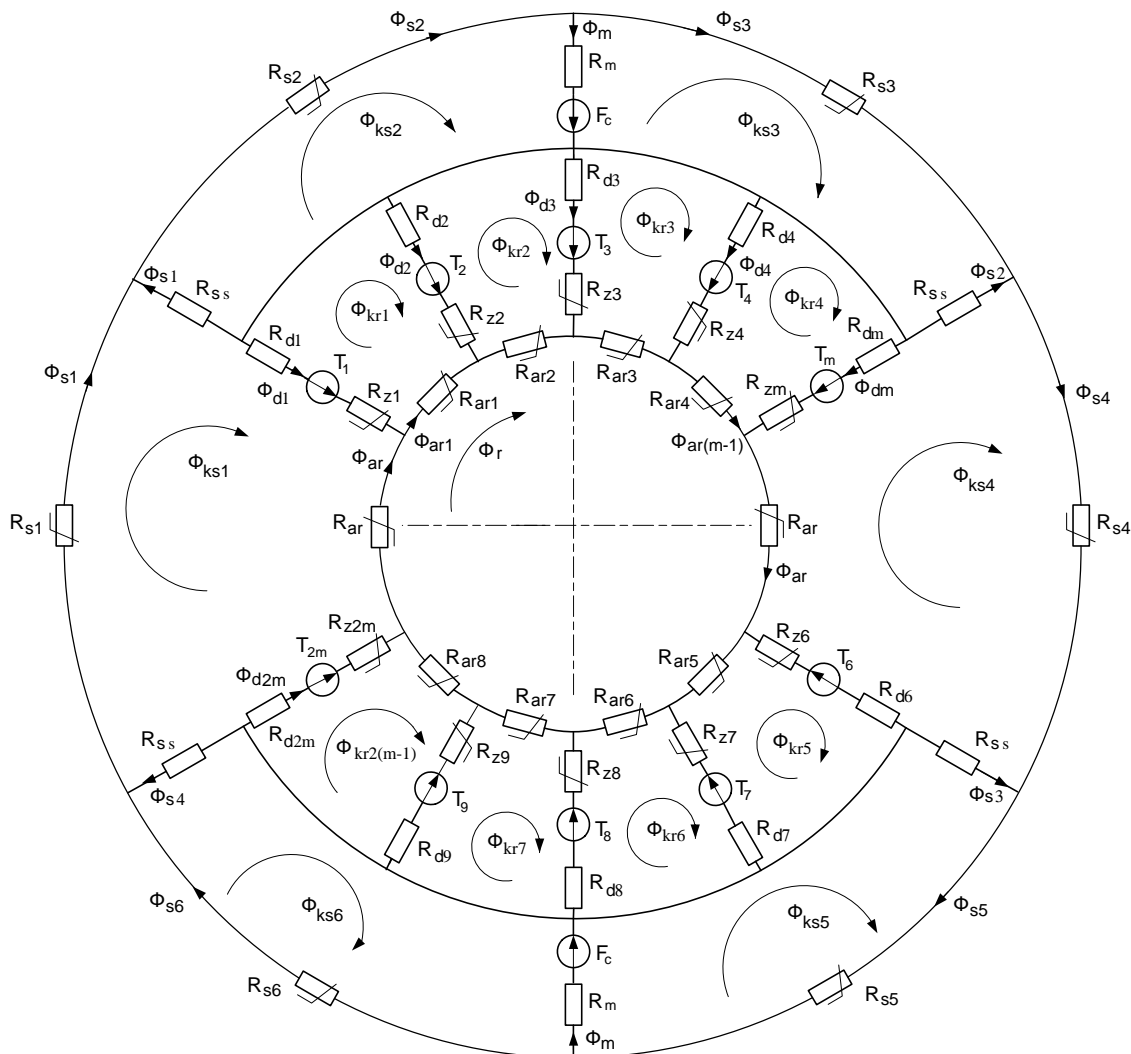


Рис. 1. Заступна схема магнітопроводу ДПС ПМ

Постійний магніт представлений на схемі у вигляді послідовно з'єднаних намагнічуючої сили F_c та постійного магнітного опору R_m , які визначаються виразами

$$F_c = H_c h_m; \quad R_m = F_c / \Phi_r = H_c h_m / B_r S_m, \quad (1)$$

де H_c – коерцитивна сила магніту; Φ_r – залишковий потік магніту; B_r – залишкова магнітна індукція магніту; h_m – висота магніту; S_m – площа нейтрального перетину магніту.

Таке представлення постійного магніту є еквівалентним до представлення його у вигляді характеристики розмагнічування $F_m [\Phi_m]$, як було зроблено у [9], однак є більш зручним для програмування. Згідно допущення, наведеного у [8], реальний зубцевий шар якоря замінюємо

еквівалентним розрахунковим шаром, який має таку ж характеристику намагнічування в радіальному напрямі. З огляду на це допущення, введення постійних магнітних опорів R_k між коронками зубців в [9] не є обґрунтованим і призводить до непотрібного ускладнення схеми. Вилучення цих опорів дає змогу не розглядати контури якоря, розташовані у просторі між магнітами, і, отже, зменшити загальну кількість рівнянь.

Намагнічуючу силу i – її вітки сектору якоря представимо у вигляді

$$T_j = T_M (2 \gamma_j / \tau); \quad T_M = (N / 4p) (i_a / 2a), \quad (2)$$

де γ_j – кут між i – ю віткою сектору якоря та поздовжньою віссю d ; τ – полюсна поділлка; i_a – струм якоря двигуна; N – повна кількість провідників обмотки якоря; $2a$ – кількість паралельних гілок обмотки якоря; p – кількість пар полюсів.

Заступній схемі магнітопроводу відповідає система нелінійних рівнянь магнітного стану ДПС ПМ (3), яка містить $(m - 1)$ рівнянь контурів якоря та три рівняння контурів статора. Ця система записана для однієї полюсної поділлки машини за методом контурних потоків та з урахуванням умов симетрії; спади намагнічуючої сили на нелінійних магнітних опорах представлені через потоки у вітках.

$$\begin{aligned} R_{\delta 1} (\Phi_{kr1} - \Phi_{ks1}) + R_{\delta 2} (\Phi_{kr1} - \Phi_{kr2}) - F_{z1} [\Phi_{\delta 1}] + F_{z2} [\Phi_{\delta 2}] - F_{ar1} [\Phi_{ar1}] &= T_2 - T_1 ; \\ R_{\delta 2} (\Phi_{kr2} - \Phi_{kr1}) + R_{\delta 3} (\Phi_{kr2} - \Phi_{kr3}) - F_{z2} [\Phi_{\delta 2}] + F_{z3} [\Phi_{\delta 3}] - F_{ar2} [\Phi_{ar2}] &= T_3 - T_2 ; \\ R_{\delta 3} (\Phi_{kr3} - \Phi_{kr2}) + R_{\delta 4} (\Phi_{kr3} - \Phi_{kr4}) - F_{z3} [\Phi_{\delta 3}] + F_{z4} [\Phi_{\delta 4}] - F_{ar3} [\Phi_{ar3}] &= T_4 - T_3 ; \\ &\vdots \\ R_{\delta(m-1)} (\Phi_{kr(m-1)} - \Phi_{kr(m-2)}) + R_{\delta m} (\Phi_{kr(m-1)} + \Phi_{ks1}) - F_{z(m-1)} [\Phi_{\delta(m-1)}] + F_{zm} [\Phi_{\delta m}] - \\ - F_{ar(m-1)} [\Phi_{ar(m-1)}] &= T_m - T_{(m-1)} ; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{\sigma s} (\Phi_{ks1} - \Phi_{ks2}) + R_{\sigma s} (\Phi_{ks1} + \Phi_{ks3}) + R_{\delta 1} (\Phi_{ks1} - \Phi_{kr1}) + R_{\delta m} (\Phi_{ks1} + \Phi_{kr(m-1)}) + F_{z1} [\Phi_{\delta 1}] - \\ - F_{zm} [\Phi_{\delta m}] - F_{ar} [\Phi_{ar}] + F_{s1} [\Phi_{s1}] &= T_1 + T_m ; \\ R_{\sigma s} (\Phi_{ks2} - \Phi_{ks1}) + F_{s2} [\Phi_{s2}] + R_m (\Phi_{ks2} - \Phi_{ks3}) &= F_m ; \\ R_{\sigma s} (\Phi_{ks3} + \Phi_{ks1}) + F_{s3} [\Phi_{s3}] + R_m (\Phi_{ks3} - \Phi_{ks2}) &= - F_m . \end{aligned}$$

На основі системи рівнянь (3) складена програма розрахунку магнітного стану ДПС ПМ. Проведені розрахунки магнітного стану з врахуванням відсутності в експериментальному взірці обмотки якоря, тобто для випадку, коли намагнічуючі сили віток якоря дорівнюють нулю ($T_1 = T_2 = \dots = T_m = 0$).

Результати розрахунку: потік магніту $\Phi_{m,розн.} = 0,347 \cdot 10^{-3}$ Вб; індукція у повітряному проміжку $B_{\delta} = 0,272$ Тл; індукція у зубці якоря $B_z = 0,272$ Тл; індукції у ділянках ярма статора $B_{s1} = 1,38$ Тл, $B_{s2} = 1,447$ Тл, $B_{s3} = -1,447$ Тл.

Оскільки у ДПС ПМ джерелом постійного потоку є магніт, адекватність розрахунку магнітного кола доцільно перевірити за значенням цього потоку.

На рис. 2 представлено ескіз експериментального взірця ДПС ПМ для перевірки адекватності розрахунку магнітного кола. Статор взірця складається з постійного магніту 1 та феромагнітного ярма 2. В середині статора розташований необмотаний якір двигуна 3, діаметральні пази якого заповнені діелектриком 4. У цих пазах намотана вимірювальна котушка 5, що містить $w_{кот.} = 10$ витків тонкого мідного дроту.

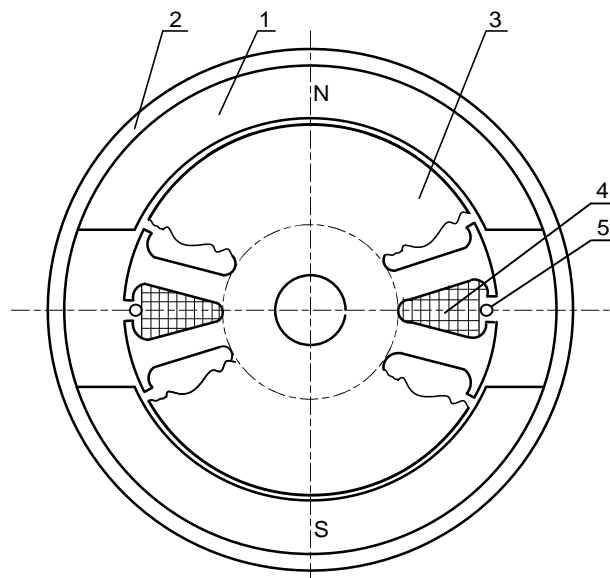


Рис. 2. Ескіз взірця ДПС ПМ з вимірювальною котушкою

Виводи вимірювальної котушки приєднуються до мілівеберметра (флюксметра) М19. Перевірка магнітного потоку постійного магніту проводиться шляхом повільного повороту якоря з вимірювальною котушкою на 90 градусів з положення геометричної нейтралі до положення, яке відповідає осі магнітів, і у зворотному напрямку. Під час повороту фіксується відхилення α стрілки мілівеберметра. Мілівеберметр має меншу чутливість у порівнянні з балістичним гальванометром. Однак, як зазначено у [10], під час вимірювання потоків, які змінюються повільно (секунди і хвилини), мілівеберметр значно переважає за точністю балістичний гальванометр. В [11] наведено, що у випадку вимірювання сильних полів мілівеберметр має низку переваг порівняно з балістичним гальванометром. Опір вимірювальної котушки становить $R_{\text{кот.}} = 2 \text{ Ом}$. Це відповідає рекомендації [10], де вказано, що опір зовнішнього кола для мілівеберметрів М19 не повинен перевищувати 8 Ом.

Потік постійного магніту визначається формулою [11]

$$\Phi_{\text{м.екс.}} = C_{\phi} \alpha / (2 w_{\text{кот.}}) = 0,1 \cdot 70 / (2 \cdot 10) = 0,35 \text{ мВб}, \quad (4)$$

де C_{ϕ} – стала мілівеберметра, мВб/под; α – середнє значення відхилення стрілки мілівеберметра; $w_{\text{кот.}}$ – кількість витків вимірювальної котушки;

Порівнюючи експериментальне значення потоку $\Phi_{\text{м.екс.}}$ з розрахунковим $\Phi_{\text{м.розн.}} = 0,347 \text{ мВб}$, отримуємо відносну похибку розрахунку

$$\delta = \frac{\Phi_{\text{м.екс.}} - \Phi_{\text{м.розн.}}}{\Phi_{\text{м.екс.}}} = \frac{0,35 - 0,347}{0,35} \cdot 100 = 0,86\%$$

Висновки

Наведена уточнена заступна схема магнітопроводу ДПС ПМ та система рівнянь, які її описують. Проведені розрахунки магнітного стану ДПС та їх експериментальна перевірка показали адекватність математичної моделі магнітного стану ДПС ПМ.

Перспективи подальших досліджень

Представлена заступна схема магнітопроводу ДПС ПМ та відповідна їй система рівнянь можуть бути основним елементом для створення математичних моделей розрахунку статичних характеристик та перехідних процесів цього двигуна.

Список літератури

1. Gieras Jacek F. Permanent magnet motor technology. Design and applications. CRC Press Taylor and Francis Group. London, New York, 2010, 603 p.

- <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=5916ac245b49523d143b0c12&assetKey=AS%3A493445925924865%401494658084441>
2. Белый П.Н. Уравнения для проектирования встраиваемых магнитоэлектрических двигателей дискового типа. *Технічна електродинаміка*. 2005, №6, с. 53-56.
 3. Dudzikowski I. Silniki komutatorowe wzbudzane magnesami trwałymi. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, № 58, *Studia i Materiały* № 25, 2005.
 4. Шайда В.П., Юр'єва О.Ю. Застосування гібридного збудження в двигуні постійного струму для привода транспортних валків у металургійній промисловості. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, № 1(9), 2023.
<http://pema.khpi.edu.ua/article/view/282183/276353>; doi: 10.20998/2079-3944.2023.1.0
 5. Лазарєв Г.В., Рыбка Я.В., Реуцький М.О., Крячок А.А., Шиманська А.А. Підвищення максимального моменту спеціальних електродвигунів постійного струму з постійними магнітами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. “Електротехніка і електромеханіка”, №2 (16), 2020.
<http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/283760>; doi:10.20998/2413-4295.2023.02.04
 6. Маляр В.С., Глухивский Л.И., Маляр А.В., Гречин Д.П., Гавдѡ И.Р. Расчет магнитной цепи однофазного асинхронного двигателя с расщепленными полюсами. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. Минск. 2003, №3, С. 17-25. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-3-17-25/>
 7. Гавдѡ И.Р. Електромагнітні процеси в асинхронних двигунах з екранованими полюсами: авторефер. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.01. “Електричні машини і апарати”. НУ “Львівська політехніка” – Львів, 2005. – 17 с.
 8. Maliar V., Havdo I. Mathematical model of permanent magnets direct current motor. “*Computational Problems of Electrical Engineering*”, Львів, 2015, № 1, Vol. 5, p. 33 – 36.
 9. Гавдѡ И.Р. Математична модель магнітного стану колекторного двигуна з магнітоелектричним збудженням. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2019. Вип. 1, № 1.С. 10-16.
<https://science.lpnu.ua › maketno12019zdoi1-10-16>
 10. Кифер И.И. Испытание ферромагнитных материалов. М. – Л., Госэнергоиздат. 1962, 544 С.
 11. Основи метрології та електричних вимірювань [Електронний ресурс]: методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів напрямів підготовки «Електротехніка та електротехнології» й «Електромеханіка» Ч. 2. / НТУУ «КПІ»; уклад.: Хлистов В.М., Лавренова Д.Л.. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,73 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 85 с.
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16423>

References

1. Gieras Jacek F. Permanent magnet motor technology. Design and applications. CRC Press Taylor and Francis Group. London, New York, 2010, 603 p.
<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=5916ac245b49523d143b0c12&assetKey=AS%3A493445925924865%401494658084441>
2. Belyi P.N. Uravnenia dla proektirovaniya vstraivaemykh magnitoelektricheskikh dvigatelej diskovogo tipa. *Technichna elektrodynamika*. 2005, №6, p. 53-56. (Rus).
3. Dudzikowski I. Silniki komutatorowe wzbudzane magnesami trwałymi. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, № 58, *Studia i Materiały* № 25, 2005. (Pol).
4. Shajda V.P., Jurieva O.Y. Zastosuvania hibrydnogo zbudzhenia v dvyhuni postijnogo strumu dlia pryvoda transportnykh valkiv u metalurhijnij promyslovosti. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI»*. Seria: Problemy udoskonalivuvania elektrychnykh macsyn i aparativ. Teoria i praktyka, № 1(9), 2023. (Ukr).
<http://pema.khpi.edu.ua/article/view/282183/276353>; doi: 10.20998/2079-3944.2023.1.0
5. Lazarev H.V., Rybka Y.V., Reutskiy M.O., Kriachok A.A., Shymanska A.A. Pidvyshchenia maksimalnogo momentu spetsialnykh elektrodvyhuniv postijnogo strumu z postijnymy mahnitamy. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «KhPI»*. “Elektrotekhnika i elektromekhanika”, №2 (16), 2020. (Ukr).
6. Maliar V.S, Hluchivskij L.Y, Maliar A.V, Hreczyn D.P, Havdo I.R. Raszczet magnitnoj tsepi odnofaznogo asinchronnogo dvigatela s rasczeplennymi poliუსami. *Energetika. Izvestija vysshych uczebnych zavedenij i energeticheskikh obedynenij SNH*. Minsk. 2003, №3, с. 17-25. (Rus).
7. Havdo I.R.. Elektromahnitni protsesy v asynkhronnykh dvyhunakh z ekranovanymy poliւսamy: avtorefer. dys. na zdobutia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 05.09.01. “Elektrychni mashyny i aparaty”. NU “Lvivska politekhnika” – Lviv, 2005. – 17 с. (Ukr).

8. Maliar V., Havdo I. *Mathematical model of permanent magnets direct current motor*. “Computational Problems of Electrical Engineering”, Львів, 2015, № 1, Vol. 5, p. 33 – 36.

9. Havdo I.R. *Mathematical model of magnetic state of permanent magnet DC motor*. *Elektroenergetyczni ta elektromechaniczni systemy*. 2019. Vyp. 1, No 1. Pp. 10-16. (Ukr).

<https://science.lpnu.ua/maketto12019zdoi1-10-16>

10. Kifer I.I. *Ispytanie feromagnitnykh materialov*. M. – L., Hosenerhjizdat. 1962, 544 P. (Rus).

11. *Osnovy metrolohii ta elektrychnykh vymiriuvan [Elektroni resurs]: metodychni vказivky do laboratornykh robit dlia studentiv napriamiv pidhotovky «Elektrotehnika ta elektrotekhnolohii» i «Elektromekhanika» Ch. 2. / NTUU «KPI» ; uklad.: Khlystov V.M., Lavrenova D.L. – Elektroni tekstovi dani (1 fail: 2,73 Mbite). – Kyiv : NTUU «KPI», 2013. – 85 p. (Ukr).*

<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16423>

I. Havdo

Lviv Polytechnic National University,

Department of Electromechanics and Computerized Electromechanical Systems

Ihor.r.havdo@lpnu.ua

MAGNETIC FIELD OF A DC MOTOR WITH EXCITATION FROM PERMANENT MAGNETS

© Havdo I., 2023

Currently, DC motors with excitation from permanent magnets (PM DC) are widely used in vehicles, household appliances, portable power tools due to their simple design and low cost. Therefore, the task of creating mathematical models for their calculation, which can be used for design, is urgent. The purpose of the article is to clarify the mathematical model of the magnetic state of the PM DC and experimental verification of the correspondence of the experimental results to the calculation results. The theory of magnetic and electric circuits is used to describe the magnetic state of the PM DC. A refined branched replacement circuit of the PM DC magnetic circuit with concentrated parameters is proposed. In this scheme, permanent magnetic resistances correspond to non-magnetic sections of the magnetic circuit. Sections of the magnetic conductor made of ferromagnetic materials correspond to nonlinear magnetic resistances, which are represented by the dependence $F[\Phi]$ of the decay of the magnetizing force on the magnetic resistance on the magnetic flux. The toothed area of the armature, placed under the magnets, is divided into m identical sectors by radial planes perpendicular to the plane of the armature sheets. The substitute scheme of the magnetic circuit is described by a system of nonlinear equations compiled for one pole division of the motor using the method of loop currents. This system contains three equations for the stator loops and $(m - 1)$ equations for the armature loops. The results of the calculation of the magnetic flux and inductions in different sections of the magnetic conductor of the PM DC are presented. The adequacy of the calculation of the magnetic circuit of the PM DC is checked in relation to the magnet flux. The experimental sample of PM DC consists of a stator and an unwound armature. In the diametrical grooves of the armature, filled with dielectric, a measuring coil is wound, the turns of which are located near the air gap. The terminals of the measuring coil are connected to the fluxmeter. The deflection of the fluxmeter needle during the rotation of the armature from the position of the coil, which corresponds to the geometric neutral, to its position, which coincides with the axis of the poles, was recorded. The calculated and experimental values of the magnetic flux coincide with an accuracy of 0.86%, which confirms the adequacy of the proposed mathematical model of the magnetic state of the PM DC. The proposed replacement scheme of the magnetic circuit and the system of equations describing it can be the basis for creating mathematical models for calculating the static characteristics and transient modes of the PM DC.

Keywords: DC commutator motor, permanent magnet, substitute circuit, system of nonlinear equations, experimental verification.