

Динамическая модель коллекторного двигателя постоянного тока, возбуждаемого от постоянных магнитов, с учетом влияния реальных факторов*

Шестаков А.В.

Вятский государственный университет
г. Киров, Российская Федерация
alexvs1975@yandex.ru

Аннотация. Коллекторные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов по-прежнему находят широкое применение в управляемых электроприводах различных систем благодаря своим высоким энергетическим и массогабаритным показателям. В связи с этим актуальной остается проблема оптимального проектирования названных двигателей. Одним из способов оптимизации массогабаритных, энергетических и динамических характеристик коллекторных двигателей постоянного тока с постоянными магнитами является моделирование переходных процессов. Для решения этой задачи в данной статье предлагается динамическая модель двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, основанная на системе дифференциальных уравнений машины постоянного тока. В названной системе для учета влияния коммутационной реакции якоря на результирующий поток в воздушном зазоре, а также для учета влияния насыщения на индуктивность якоря по поперечной оси предложено использовать нелинейную характеристику намагничивания машины постоянного тока, аппроксимированную гиперболической функцией. Результаты расчетов показали работоспособность предложенной модели и возможности ее применения для оптимизации динамических, энергетических и массогабаритных показателей двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

Ключевые слова: коллекторный двигатель постоянного тока, возбуждение от постоянных магнитов, динамическая модель, коммутационная реакция якоря, характеристика намагничивания, переходные процессы

ВВЕДЕНИЕ

Коллекторные двигатели постоянного тока (ДПТ) с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) до сих пор широко применяются в управляемых электроприводах различных систем [1-3], несмотря на наличие щеточного узла, вызывающего искрение и радиопомехи. Названные двигатели работают в условиях значительного изменения температуры окружающей среды, пониженного атмосферного давления, высокой влажности воздуха и вибрации мест установки. Значительное распространение двигатели постоянного тока с постоянными магнитами получили благодаря высоким массогабаритным, энергетическим и динамическим показателям [4-5]. В связи с этим, актуальной остается проблема оптимального проектирования названных двигателей [6-8].

Одним из инструментов оптимизации динамических, энергетических и массогабаритных показателей коллекторных ДПТ с ПМ является моделирование переходных процессов. Математические модели позволяют анализировать быстродействие проектируемых двигателей, осуществлять факторные эксперименты, в которых независимыми переменными выступают параметры ДПТ с ПМ, а функциями отклика – коэффициент полезного действия, потребляемый ток, полезная мощность и другие энергетические показатели.

Существует ряд динамических моделей ДПТ с ПМ, основанных на системах дифференциальных уравнений машины постоянного тока [9-11] в разных системах координат [12-21]. Указанные модели учитывают влияние различных реально действующих факторов (поле реакции якоря, характеристику намагничивания ДПТ, вихревые токи в стали магнитопровода). Однако, большинство из перечисленных моделей используют решение полевых задач, и требуют больших вычислительных ресурсов, что не всегда удобно при проектной оптимизации ДПТ с ПМ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью наших исследований является создание эффективного инструмента для решения задач моделирования и проектной оптимизации двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов.

Первой задачей исследований была разработка динамической модели коллекторного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов, которая учитывает влияние насыщения и коммутационной реакции якоря на параметры и поток воздушного зазора ДПТ.

Второй задачей была реализация названной модели ДПТ с ПМ в виде программы для ЭВМ, обладающей минимальными затратами вычислительных ресурсов, и необходимой для исследований и проектной оптимизации ДПТ с ПМ.

Динамическая модель ДПТ с возбуждением от ПМ с учетом насыщения и коммутационной реакции якоря

Рассматривается коллекторный двигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, напрямую подключаемый к источнику напряжения. Отсутствуют добавочные полюса и компенсационная обмотка. Влияние поперечной реакции якоря исключено путем стабилиза-

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

ции постоянных магнитов. Щетки установлены на геометрическую нейтраль.

Дифференциальные уравнения ДПТ с возбуждением от ПМ записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{I}{L_{a,H}} \cdot (U - R_a \cdot i_a - C_e \cdot \omega_r \cdot \Phi_\delta); \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J} \cdot (C_M \cdot i_a \cdot \Phi_\delta - M_T - M_C), \end{cases} \quad (1)$$

где i_a – ток цепи якоря; U – напряжение, приложенное к цепи якоря; R_a – активное сопротивление цепи якоря (включая сопротивление щеточного контакта); ω_r – угловая скорость якоря; C_e – постоянная ЭДС двигателя; C_M – постоянная момента ДПТ; p – число пар полюсов; J – момент инерции якоря; $L_{a,H}$ – индуктивность якоря с учетом насыщения; Φ_δ – результирующий поток в воздушном зазоре; M_T – момент холостого хода, создаваемый трением и потерями в стали якоря; M_C – момент сопротивления нагрузки.

Момент, создаваемый трением и потерями в стали, может быть записан в следующем виде:

$$M_T = \frac{M_{T,ном} \cdot 60 \cdot \omega_r}{2\pi \cdot n_{ном}}, \quad (2)$$

где $M_{T,ном}$ – момент холостого хода, рассчитанный для номинального режима; $n_{ном}$ – номинальная частота вращения.

Характеристика намагничивания ДПТ с ПМ может быть выражена в относительных единицах и аппроксимирована гиперболической функцией (рис. 1):

$$\varphi = \frac{a \cdot f^*}{1 + b \cdot f^*}, \quad (3)$$

где φ – значение магнитного потока, выраженное в относительных единицах; f^* – значение МДС, выраженное в относительных единицах; a , b – постоянные коэффициенты аппроксимации.

Магнитный поток в системе относительных единиц равен:

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_M}, \quad (4)$$

где Φ – текущее значение магнитного потока в воздушном зазоре ДПТ; Φ_M – расчетный магнитный поток ПМ, равный $\Phi_M = B_M \cdot Q_M$; B_M – индукция в нетральном сечении ПМ, Q_M – площадь нейтрального поперечного сечения ПМ [22].

МДС в системе относительных единиц выражается следующим образом:

$$f^* = \frac{F}{F_M}, \quad (5)$$

где F – текущее значение МДС; F_M – полная МДС постоянных магнитов на пару полюсов, равная $F_M = 2H_C \cdot h_p$; H_C – коэрцитивная сила материала ПМ; h_p – высота постоянного магнита.

Результирующий магнитный поток в воздушном зазоре ДПТ с ПМ в любой момент времени определяется:

$$\Phi_\delta = \varphi_\delta \cdot \Phi_M, \quad (6)$$

где φ_δ – результирующий поток в воздушном зазоре, определенный по характеристике (3) для соответствующего значения МДС $f^* = \Sigma f^*$ (рис. 1).

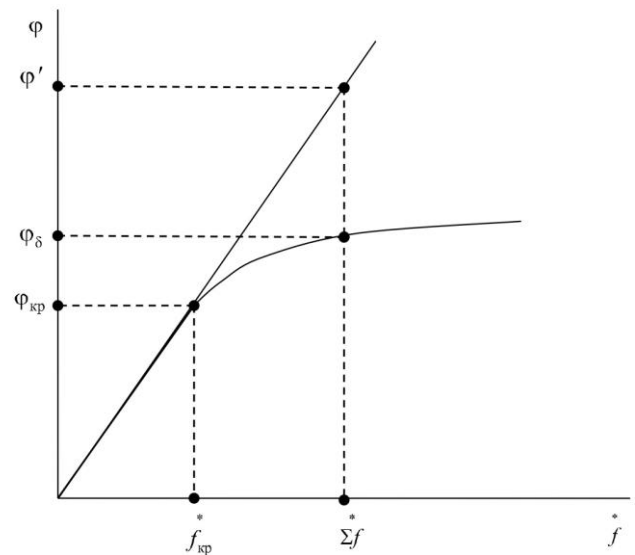


Рис. 1. Характеристика намагничивания ДПТ с ПМ

Результирующая МДС определяется в виде:

$$\Sigma f^* = \frac{\Sigma F}{F_M}, \quad (7)$$

где ΣF – суммарная МДС, выраженная в амперах, $\Sigma F = F_\Sigma + F_K$,

F_Σ – МДС, соответствующая режиму ДПТ после стабилизации постоянных магнитов (полагается постоянной); F_K – МДС коммутационной реакции якоря.

Значение МДС F_K для любого значения тока и частоты вращения якоря рассчитывается в соответствии с [22]:

$$F_K = b_K A_{2ном} \cdot \frac{i_2^2 \cdot \omega}{a'_0 + b'_0 \cdot i_2 + \omega \cdot i_2} \cdot \left(1 + \frac{0,2\pi \cdot \tau_2}{\delta_0 \cdot \lambda_2} \cdot 10^{-6} \right), \quad (9)$$

где b_K – ширина зоны коммутации, м; $A_{2ном}$ – линейная нагрузка ДПТ в номинальном режиме, А/м; i_2 – текущее относительное значение тока якоря $i_2 = \frac{i_a}{I_{a,ном}}$, $I_{a,ном}$ – номинальный ток якоря; ω – текущее относительное значение частоты вращения якоря $\omega = \frac{n_r}{n_{ном}}$, n_r – текущее

значение частоты вращения якоря, мин^{-1} , $n_r = \frac{60 \cdot \omega_r}{2\pi \cdot p}$;

$n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения якоря, мин^{-1} ; τ_2 – полюсное деления якоря ДПТ, м; δ_0 – средняя длина силовой линии поля в поперечном пространстве ДПТ, м; λ_2 – удельная магнитная проводимость рассеяния обмотки якоря; a'_0 и b'_0 – коэффициенты, зависящие от размеров и марки щеток, а также от индуктивности коммутируемой секции.

Индуктивность якоря с учетом насыщения может быть рассчитана следующим образом:

$$L_{a,H} = l_{\sigma a} + L_{aq} \cdot \xi_q, \quad (10)$$

где $l_{\sigma a}$ – индуктивность рассеяния якоря; L_{aq} – взаимная индуктивность ДПТ по поперечной оси; ξ_q – критериальный коэффициент, учитывающий насыщение по поперечной оси [23].

Для определения коэффициента ξ_q по [23] была найдена аппроксимирующая зависимость:

$$\xi_q = \left[7,69 \cdot (k_\mu - 1) + 1 \right]^{-0,5}, \quad (11)$$

где k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи ДПТ. Значение коэффициента k_μ для любой МДС может быть определено по формуле:

$$\begin{cases} \text{если } \varphi_\delta < \varphi_{\text{кр}}, \text{ то } k_\mu = 1; \\ \text{если } \varphi_\delta \geq \varphi_{\text{кр}}, \text{ то } k_\mu = \frac{\varphi'}{\varphi_\delta}, \end{cases} \quad (12)$$

где $\varphi_{\text{кр}}$ – критическое значение потока в воздушном зазоре ДПТ (точка отхода касательной от прямолинейной части характеристики намагничивания); φ' – значение потока, определенное по продолжению прямолинейной части характеристики намагничивания (рис.1) при текущем значении МДС $f = \sum f^*$ (7),

$$\varphi' = \varphi_{\text{кр}} \cdot \frac{\sum F}{F_{\text{кр}}}, \quad (13)$$

$F_{\text{кр}}$ – критическое значение МДС, А, в точке отхода касательной от прямолинейной части характеристики намагничивания.

На основе (1)-(13) была составлена программа для ЭВМ **dpt12n.bas**, позволяющая рассчитать переходные процессы в ДПТ с ПМ при пуске и в других режимах. В программе, кроме расчета тока якоря i_a и частоты вращения якоря n_r , предусмотрено также определение текущих значений электромагнитного момента:

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M \cdot i_a \cdot \Phi_\delta \quad (14)$$

и полезной мощности на валу

$$P_2 = 0,104 \cdot M_2 \cdot n_r, \quad (15)$$

где M_2 – полезный момент на валу ДПТ, равный

$$M_2 = M_{\text{ЭМ}} - M_T. \quad (16)$$

Результаты расчетов по программе **dpt12n.bas** выводятся в текстовый файл.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием программы **dpt12n.bas** было выполнено моделирование переходных процессов при пуске микродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов ДП-63-40-3,0-24. Данная машина представляет собой малогабаритный исполнительный двигатель, применяемый в следящих автоматических системах. Двигатель ДП-63-40-3,0-24 имеет закрытое исполнение и щеткодержатели с повышенной прочностью.

Номинальные данные ДПТ: номинальная мощность $P_{2,\text{ном}} = 40$ Вт; номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 24$ В; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 3000 \pm 300$ мин^{-1} .

Расчетные параметры двигателя: полная МДС постоянных магнитов $F_M = 3648$ А; расчетный магнитный поток в воздушном зазоре $\Phi_M = 0,51$ мВб; МДС после стабилизации ПМ $F_\Sigma = 502$ А; активное сопротивление цепи якоря (с учетом сопротивление щеточного контакта) $R_a = 2,1$ Ом; взаимная индуктивность якоря по поперечной оси $L_{aq} = 6,457 \cdot 10^{-3}$ Гн; индуктивность рассеяния якоря $l_{\sigma a} = 0,774 \cdot 10^{-3}$ Гн; полюсное деление якоря $\tau_2 = 6,5 \cdot 10^{-3}$ м; ширина зоны коммутации $b_k = 3,04 \cdot 10^{-3}$ м; момент инерции якоря $J = 6,1 \cdot 10^{-5}$ кг·м²; коэффициенты аппроксимации характеристики намагничивания по (3) $a = 14,7$; $b = 7,5$.

Результаты моделирования представлены на рис. 2-6. Значение момента сопротивления нагрузки M_C было принято равным 0,1146 Н·м.

Как видно из представленных осциллограмм, процесс пуска ДПТ с ПМ происходит устойчиво. Установившееся значение тока якоря равно 2,76 А (рис. 2), установившееся значение частоты вращения якоря составляет 3355 мин^{-1} (рис. 4), установившееся значение полезной мощности (рис. 5) соответствует номинальной (40 Вт). Полученные значения основных величин исследуемого ДПТ с ПМ входят в допустимые пределы отклонения.

Кратность пускового тока (по отношению к установившемуся его значению) составила 3,83 отн. ед. (рис. 2), кратность максимального электромагнитного момента (рис. 3) равна 3,82 отн. ед., кратность максимального полезного момента на валу ДПТ (рис. 6) – 4,67 отн. ед. Указанные значения кратности пусковых тока и моментов также находятся в допустимых пределах для данного класса электрических машин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования переходных процессов пуска коллекторного микродвигателя постоянного тока с ПМ позволяют сделать вывод о работоспособности предложенной динамической модели и программного обеспечения для ее реализации. Программа может быть использована для проектной оптимизации коллекторных микродвигателей постоянного тока с ПМ с целью повышения быстродействия данных двигателей в управляемых электроприводах различного назначения.

Дальнейшее совершенствование модели возможно путем учета уменьшения индуктивностей рассеяния якоря при больших пусковых токах.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность студенту ВятГУ (магистратура, программа «Электромеханика») К.С. Вологжанину за выполнение поверочных расчетов исследуемого двигателя.

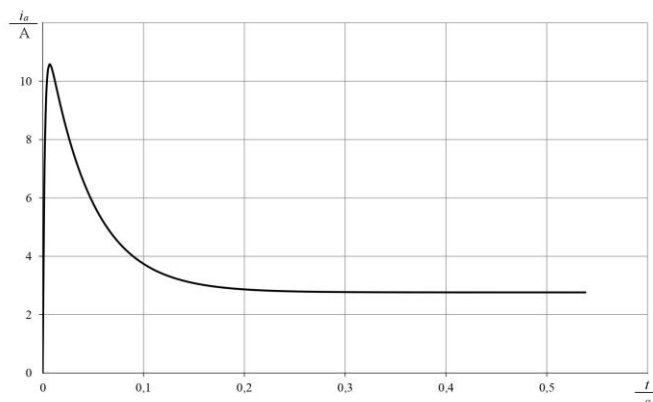


Рис. 2. Осциллограмма тока якоря при пуске двигателя ДП-63-40-3,0-24

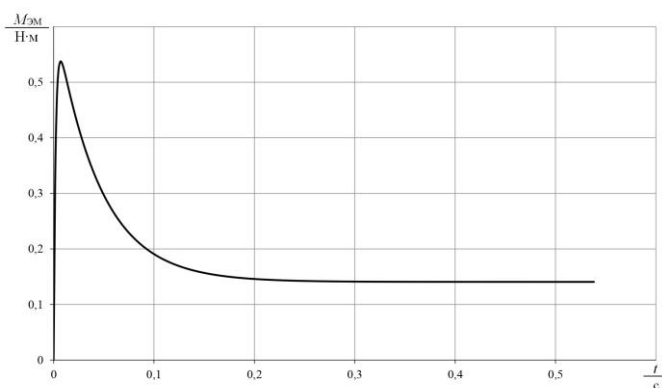


Рис. 3. Осциллограмма электромагнитного момента при пуске двигателя ДП-63-40-3,0-24

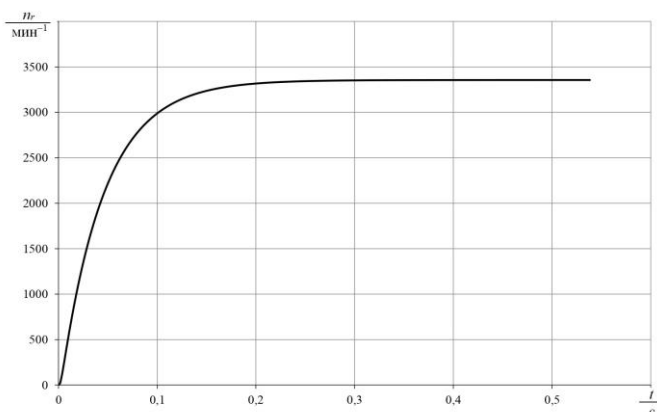


Рис. 4. Осциллограмма частоты вращения якоря при пуске двигателя ДП-63-40-3,0-24

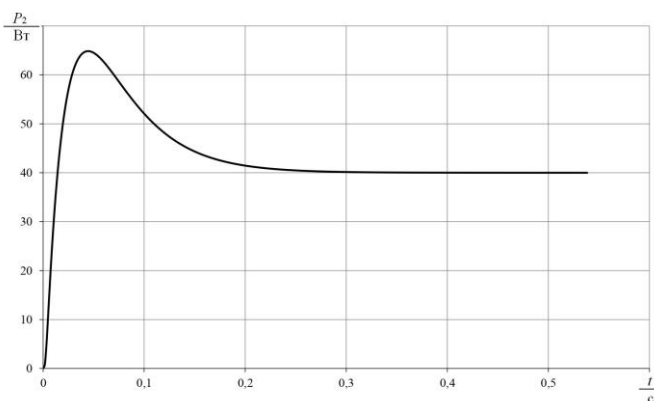


Рис. 5. Осциллограмма полезной мощности на валу при пуске двигателя ДП-63-40-3,0-24

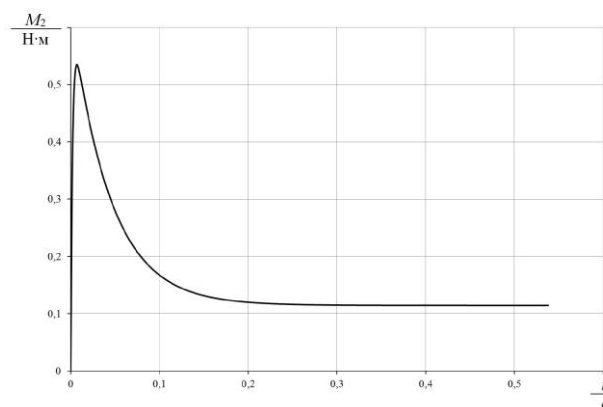


Рис. 6. Осциллограмма полезного момента на валу при пуске двигателя ДП-63-40-3,0-24

ЛИТЕРАТУРА

- Осин И.Л. Электрические двигатели с постоянными магнитами в системах возбуждения / И.Л. Осин, Ю.А. Мощинский // Электротехника. – 2007 – № 8. – С. 13-18.
- Labbe N.P. Innovative permanent-magnet starter motors for automotive micro-hybrid applications / N.P. Labbe, R. Andreux, J.-P. Yonnet, A. Vauquelin, J.-P. Vilain // Electrical Machines (ICEM) 2014 International Conference. – 2014. – P. 2436-2441.
- Šustek M. DC motors and servo-motors controlled by Raspberry Pi 2B / M. Šustek, M. Marčanik, P. Tomášek, Z. Úředníček, N. Mastorakis, V. Mladenov, A. Bulucea // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 125. – P. 20-25, 2017.
- Takura Daichi. Variable characteristics DC motor by changing brush lead angle to expand the operation range / Daichi Takura, Kan Akatsu // Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia) 2015 9th International Conference. – 2015. – P. 695-700.
- Chu H. Low speed control for permanent magnet dc torque motor using observer-based nonlinear triple-step controller / H. Chu, B. Gao, W. Gu and H. Chen // IEEE Trans. Ind. Electron. – Apr. 2017. – Vol. 64, no. 4. – P. 3286-3296.
- Grmela P. Permanent magnet DC motor re-design by FEMM / P. Grmela, M. Mach, V. Hájek // Electrical Machines

and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP) 2011 International Aegean Conference. – 2011. – P. 666-669.

7. Karnavas L. Yannis. Optimization of Standard PMDC Motors Used in Automotive Applications for Higher Power Density / Yannis L. Karnavas, Ioannis D. Chasiotis, Emmanouil D. Peponakis // Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI) 2016 Third International Conference. – 2016. – P. 7-13.

8. Sun Ruolan. Research on Optimal Design of Commutation Performance of Starter-Generator Used in Aero-Engine / Ruolan Sun, Huideng Peng, Daolong Shi, Guisong Huang, Liang Zhuo // IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG). – 2021. – P. 1-5, 2021.

9. Литовченко В.В. Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя / В.В. Литовченко, Д.В. Кокорин, Д.В. Назаров // Электротехника. – 2014 – № 8. – С. 22-28.

10. Евсеев В.Ю. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с раздельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов / Евсеев В.Ю., А.Н. Савоськин // Электротехника. – 2020 – № 9. – С. 32-38.

11. Епифанов О.К. Электромагнитный момент и его пульсации в униполярном бесконтактном моментном электродвигателе с постоянными магнитами / О.К. Епифанов, Ю.В. Гречушкин, И.А. Салова // Электротехника. – 2021 – № 1. – С. 26-33.

12. Sincero C. R. Geraldo. Efficient simulation method for comparison of brush and brushless DC motors for light traction application / Geraldo C. R. Sincero, Jerome Cros, Philippe Viarouge // 13th European Conference Power Electronics and Applications EPE '09. – 2009. – P. 1-10.

13. Sincero G.C.R. Collector model for simulation of brush machines / G.C.R. Sincero, J. Ghannou, J. Cros, P. Viarouge // Mathematics and Computers in Simulation. – 2010.– Vol. 81. – P. 340.

14. Andreux R. Magnetic field-electric circuit coupled method for brush DC motor simulations / R. Andreux, J. Fontchastagner, N. Takorabet, N. Labbe, J.-S. Metral // Electrical Machines (ICEM) 2012 XXth International Conference. – 2012. – P. 2683-2688.

15. Kahoul R. New Behavioral Modeling of EMI for DC Motors Applied to EMC Characterization / Rami Kahoul, Yacine Azzouz, Blaise Ravelo, Belahcene Mazari // Industrial Electronics IEEE Transactions. – 2013. – Vol. 60, no. 12. – P. 5482-5496.

16. Andreux Raphael. A general approach for brushed dc machines simulation using a dedicated field/circuit coupled method / Raphael Andreux, Julien Fontchastagner, Nouredine Takorabet, Nicolas Labbe, Jean-Sebastien Metral // Progress In Electromagnetics Research. – 2014. – Vol. 145. – P. 213.

17. Oganezova I. EMC model of low voltage DC motor / I. Oganezova, R. Kado, B. Khvitia, Z. Kuchadze, A. Gheonjian, R. Jobava // Electromagnetic Compatibility (EMC) 2014 IEEE International Symposium. – 2014. – P. 81-85.

18. Ghosh M. Semi-analytical dynamic model of permanent-magnet direct current brushed motor considering slotting effect commutation and PWM-operated terminal voltage / M. Ghosh, S. Ghosh, P. K. Saha, G. K. Panda // IEEE Transactions on industrial electronics. – April 2017. – Vol. 64, no. 4. – P. 2654-2662.

19. Нестерин В.А. Математическое моделирование электромагнитной системы сверхминиатюрного магнито-электрического двигателя / В.А. Нестерин, В.С. Генин, Р.А. Романов, Д.А. Токмаков // Электротехника. – 2017 – № 7. – С. 7-10.

20. Чумаева М.В. Имитационное моделирование исполнительных двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов / М.В. Чумаева // Материалы XV международной научно-практической конференции. 2018 Академическая наука – проблемы и достижения, Т.2, (26-27 марта 2018 г, North Charleston, USA) – North Charleston, USA, 2018. – С. 31-33.

21. Tikhonov A. Dynamic field model of brushed dc motor for electric drive systems research / A. Tikhonov, M. Kulenko, M. Tamyarova, A. Gusenkov // IEEE 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), (Novocherkassk, Russia, 3-6 Oct. 2018). – Novocherkassk, Russia, 2018. – P. 1-6.

22. Ермолин Н.П. Расчет коллекторных машин малой мощности – 2-е издание. – Л.: Энергия, 1973. – 216 с.

23. Рихтер Р. Электрические машины: Том 2. Синхронные машины и однофазные преобразователи. – Л.: ОНТИ, 1936. – 692 с.

Dynamic Model of DC Commutator Motor Excited by Permanent Magnets, with due Regard for the Influence of Real Factors

Shestakov A.V.

Vyatka State University
Kirov, Russian Federation
alexvs1975@yandex.ru

Abstract. DC commutator motors excited by permanent magnets, are still widely used in controlled electric drives of various systems due to their high energy and mass-dimensional characteristics. In this regard, the problem of optimal design of these motors remains relevant. One way to optimize the mass-dimensional, energy and dynamic characteristics of DC commutator motors excited by permanent magnets is to simulate transients. To solve this problem, this paper proposes a dynamic model of a DC motor excited by permanent magnets, based on a system of differential equations of a DC machine. In this system, to account for the effect of the switching armature reaction on the resulting air gap flux, as well as to account for the effect of satu-

ration on the inductance of the armature along the cross axis, it is proposed to use a nonlinear magnetization curve of a DC machine approximated by a hyperbolic function. The results of the modelling established the ability of the model proposed and the possibility of its application to optimize the dynamic, energy and mass-dimensional parameters of DC motors excited by permanent magnets.

Keywords: DC commutator motor, excitation by permanent magnets, dynamic model, switching armature reaction, magnetization curve, transients

Библиографическое описание статьи

Шестаков А.В. Динамическая модель коллекторного двигателя постоянного тока, возбуждаемого от постоянных магнитов, с учетом влияния реальных факторов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2022. – Т.9, №2. – С. 22-27. DOI: 10.24892/RIJIE/20220204

Reference to article

Shestakov A.V. Dynamic model of DC commutator motor excited by permanent magnets, with due regard for the influence of real factors, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2022, vol.9, no.2, pp. 22-27. DOI: 10.24892/RIJIE/20220204