

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО МОМЕНТА, РАЗВИВАЕМОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНОЙ С НЕЛИНЕЙНОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПЬЮ

Д. А. Вырыханов, Г. Г. Угаров

Совершенствование систем электропривода связано с необходимостью проведения расчетов динамики рабочих процессов с учетом нелинейности свойств магнитопровода. В настоящее время это требует уточнения вопросов определения силового момента, развиваемого электрической машиной. На основании предложенной математической модели определения баланса электрической, магнитной и механической мощностей преобразования энергии уточняется методология определения силового момента. Применение математического аппарата векторного анализа к скалярной функции магнитной энергии в координатах тока и потокосцепления позволило найти выражения, непосредственно сопоставляющие величине механической мощности значение противоэдс, наблюдаемой в электрическом контуре. Представленная математическая модель распространена на электрические машины с неограниченным количеством взаимодействующих электрических контуров и источников магнитодвижущей силы. Определено влияние степени насыщения магнитопровода электрической машины на величину мощности преобразования магнитной энергии в электрической машине. Показано ключевое значение отношения мгновенных величин потокосцепления к току электрического контура, для реактивных систем определяющее собственную мгновенную индуктивность, для анализа процесса электромеханического преобразования энергии. Полученные результаты дополняют классические положения определения силового момента и механической мощности, развиваемой электрическими машинами.

Ключевые слова: электромеханическое преобразование энергии, силовой момент, механическая мощность, насыщение магнитопровода, противо-ЭДС.

К настоящему времени основными преобразователями энергии, применяемыми в промышленности, являются электрические машины различного принципа действия. Важный параметр электрических машин – развиваемый силовой момент. Данный параметр определяет текущий режим работы машины, характеризующийся балансом мощностей преобразования электрической, магнитной и механической энергий, и посредством интегральных оценок данных величин определяет коэффициент полезного действия и эксплуатационные характеристики. При этом определение баланса мощностей, преобразуемых в процессе взаимного преобразования электрической, магнитной и механической форм энергий, является актуальным теоретическим вопросом, которому посвящено множество работ [1 – 4]. Анализ процессов формирования механической мощности усложняется необходимостью учета не только переходной формы происходящих процессов, но и нелинейностью свойств магнитопровода, которая оказывает значительное влияние на электромагнитный силовой момент [5 – 8]. В настоящее время отсутствует единая методология определения механической мощности, развиваемой электрической машиной, непосредственно объединяющая электромеханические системы с линейными и нелинейными свойствами магнитопровода. Определение силового момента в машинах с нелинейными свойствами магнитопровода предлагается проводить на основании предварительного расчета распределения магнитного поля в магнитопроводе с линеаризованными магнитными свойствами [5, 8].

Процесс электромеханического преобразования энергии в электрической машине, сопровождающийся протеканием тока в некотором электрическом контуре, характеризуется изменением во времени электрического тока и потокосцепления, рассматриваемого контура ψ [5, 7 – 11]. В настоящей статье на основании методов векторного анализа выражения магнитной энергии на плоскости «ток – потокосцепление» предлагается запись выражения механической мощности, развиваемой электрической машиной в условиях нелинейных свойств магнитопровода и при произвольном количестве магнитных связей рассматриваемого контура с другими источниками магнитодвижущих сил, присутствующих в конструкции машины.

Рассмотрим произвольный контур реактивной электрической машины, протекание тока по которому формирует некоторую величину потокосцепления. Изменение тока и потокосцепления определяет динамику процесса электромеханического преобразования энергии в рассматриваемой машине, формируя параметрические зависимости $i = f(t)$, $\psi = f(t)$, определяющие цикл работы машины [9, 12 – 14] на плоскости «ток – потокосцепление» (рис. 1), вдоль которого движется рабочая точка A с координатами (i, ψ) . При этом изменение магнитной энергии определится выражением производной от ее скалярной функции вдоль направления статической характеристики намагничивания, соответствующей неизменной пространственной координате $\gamma = \text{const}$, при движении рабочей точки A , по которой выполняется условие неизменности механической энергии,

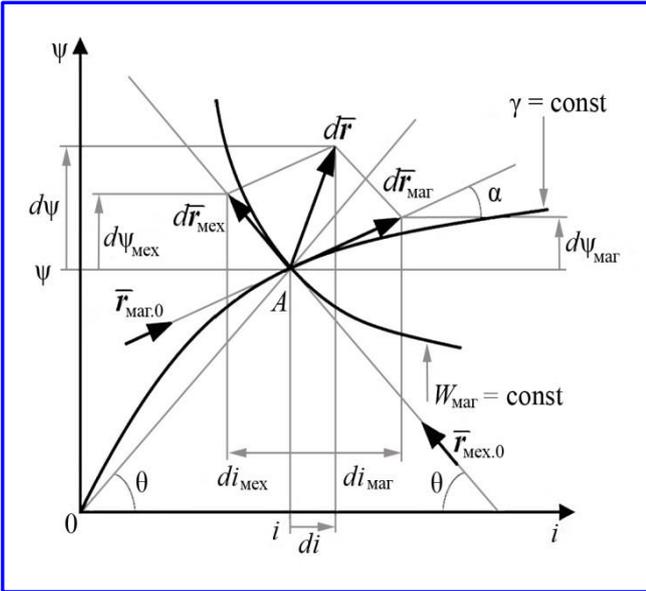


Рис. 1. Составляющие приращения тока и потокосцепления электрического контура в процессе электромеханического преобразования энергии

то есть равенства нулю механической мощности $dW_{\text{мех}}/dt = 0$ (рис. 1) [15]:

$$\frac{dW_{\text{маг}}}{dt} = \left(\frac{d\vec{r}_{\text{маг}}}{dt} \nabla \right) W_{\text{маг}} \Big|_{\frac{dW_{\text{мех}}}{dt} = 0}, \quad (1)$$

где $\vec{r}_{\text{маг}}$ – вектор, направленный по касательной к статической характеристике намагничивания $\gamma = \text{const}$ в точке A ; $\nabla = \frac{\partial}{\partial i} \vec{i}_0 + \frac{\partial}{\partial \Psi} \vec{\Psi}_0$ – оператор Гамильтона в координатах «ток – потокосцепление»; \vec{i}_0 , $\vec{\Psi}_0$ – единичные векторы направлений осей тока и потокосцепления соответственно; $W_{\text{мех}}$ – механическая энергия. Аналогично механическая мощность, развиваемая в рассматриваемом процессе, будет равна величине производной от магнитной энергии вдоль направления линии уровня скалярной функции магнитной энергии $\vec{r}_{\text{мех}}$, определяющего при движении вдоль данной линии рабочей точки A неизменность магнитной энергии (рис. 1):

$$\frac{dW_{\text{мех}}}{dt} = \left(\frac{d\vec{r}_{\text{мех}}}{dt} \nabla \right) W_{\text{маг}} \Big|_{\frac{dW_{\text{маг}}}{dt} = 0}. \quad (2)$$

Вектор дифференциально малого приращения местоположения точки A в процессе электромеханического преобразования энергии на основании закона сохранения энергии следует определить как векторную сумму приращений $d\vec{r}_{\text{маг}}$ и $d\vec{r}_{\text{мех}}$, при-

сутствующих в выражениях (1) – (2), которые представим в следующем виде:

$$d\vec{r}_A = dE_{\text{маг}} \vec{r}_{\text{маг},0} + dE_{\text{мех}} \vec{r}_{\text{мех},0}, \quad (3)$$

где $dE_{\text{маг}}$ – модуль «магнитной» составляющей скорости изменения местоположения рабочей точки A на плоскости «ток – потокосцепление»; $\vec{r}_{\text{маг},0}$ – единичный вектор, определяющий направление касательной к статической характеристике намагничивания в точке A ; $dE_{\text{мех}}$ – модуль «механической» составляющей скорости изменения местоположения рабочей точки A на плоскости «ток – потокосцепление»; $\vec{r}_{\text{мех},0}$ – единичный вектор, определяющий направление вектора $\vec{r}_{\text{мех}}$ в точке A . Проекции дифференциально малых векторов в правой части (3) на координатные оси тока и потокосцепления (рис. 1) определяют разложение на магнитную и механическую $d\psi_{\text{маг}}$ составляющие приращения потокосцепления $d\psi$ рассматриваемого электрического контура, которые определяют составляющие противо-ЭДС самоиндукции рассматриваемого электрического контура:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi_{\text{маг}}}{dt} + \frac{d\psi_{\text{мех}}}{dt}, \quad (4)$$

и приращения тока: $di = di_{\text{маг}} + di_{\text{мех}}$. Выражения магнитной (1) и механической (2) мощностей учитывают степень насыщения магнитопровода электрической машины, характеризующуюся нелинейностью статической характеристики намагничивания $\gamma = \text{const}$. Исходя из выражения линии уровня $W_{\text{маг}} = \text{const}$ будут характеризоваться касательной в произвольной рассматриваемой точке A , расположенной под углом θ , равным углу наклона линии, соединяющей начало координат с точкой A . Тангенс данного угла определит значение собственной статической индуктивности рассматриваемого электрического контура $L = \tan(\theta)$. Таким образом, величины $dE_{\text{маг}}$ и $dE_{\text{мех}}$ зависят от мгновенного значения собственной статической индуктивности рассматриваемого электрического контура.

Выражения мощностей (1) – (2) можно распространить на электрические контуры, с которыми сцеплены сторонние источники магнитодвижущих сил, определив вектор приращения местоположения рабочей точки A на плоскости «ток – потокосцепление» в виде суммы:

$$d\vec{r} = \sum_{k=1}^{k=s} \vec{r}_{\text{маг},0} dE_{\text{маг},k} + \sum_{k=1}^{k=s} \vec{r}_{\text{мех},0} dE_{\text{мех},k}, \quad (5)$$

где $dE_{\text{маг},k}$ – модуль «магнитной» составляющей приращения местоположения рабочей точки A на

плоскости «ток – потокосцепление» под действием тока, протекающего в k -м электрическом контуре; $k \in (1, 2, \dots, s)$, где s – количество электрических контуров в конструкции электрической машины; $\vec{r}_{\text{мех.0}}$ – единичный вектор, определяющий направление вектора $\vec{r}_{\text{мех}}$ в точке A ; $dE_{\text{мех.}k}$ – модуль «механической» составляющей приращения местоположения рабочей точки A на плоскости «ток – потокосцепление» под действием тока, протекающего в k -м электрическом контуре.

На основании предложенной математической модели механическая мощность, развиваемая электрической машиной, определится в виде:

$$P_{\text{мех}} = \sum_{k=1}^{k=s} i_k \frac{d\psi_{\text{мех.}k}}{dt}, \quad (6)$$

соответственно, суммарный силовой момент, развиваемый электрической машиной, определится выражением:

$$M = \sum_{k=1}^{k=s} \frac{1}{\Omega} i_k \frac{d\psi_{\text{мех.}k}}{dt} = \sum_{k=1}^{k=s} i_k \frac{d\psi_{\text{мех.}k}}{d\gamma}, \quad (7)$$

где $\Omega = d\gamma/dt$ – скорость вращения ротора электрической машины. Выражение (7), определяющее силовой момент в виде произведения мгновенного значения тока (фиксированного для рассматриваемого мгновения времени) на напряжение, согласно с выражением силового момента, предложенным в [8]. При этом выражение механической мощности (6) справедливо для машин с линейными и нелинейными характеристиками магнитопровода. Оно показывает, что нелинейность магнитных свойств магнитопровода электрической машины оказывает влияние на особенности цикла работы электрической машины, изменяя соотношения в векторном балансе (5) магнитной и механической составляющих приращений местоположения рабочей точки A в координатах тока и потокосцепления (см. рис. 1). При этом механическая мощность (6) определяется при использовании мгновенного значения индуктивности электрического контура, определенной как отношение мгновенного значения потокосцепления к мгновенному значению тока $L = \psi/i$ (см. рис. 1), которые фиксированы для рассматриваемого мгновения времени. Одновременно выражение (2), определяющее механическую мощность и с ее помощью силовой момент согласно (7), не требует предварительного расчета распределения магнитного поля в магнитопроводе машины при линеаризованных свойствах магнитопровода.

Апробацию предлагаемой методики расчета проведем на основании математического моделирования процессов срабатывания линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД) в режиме существенного насыщения стали магнитопровода. Конструкция ЛЭМД (рис. 2) является осесимметричной, что позволяет повысить точность расчетов за счет решения задачи распределения магнитного поля в осесимметричной постановке [17] на секущей полуплоскости, проходящей через ось симметрии конструкции ЛЭМД (рис. 2). В соответствии с линейной формой движения якоря ЛЭМД в выражении (7) $\Omega = d\gamma/dt$ будет являться линейной скоростью перемещения якоря электромагнита, а физический смысл M изменится на развиваемое электромагнитом усилие $F_{\text{эл.м}}$, измеряемое в ньютонах. В дальнейших расчетах пренебрегаем усилием, противодействующим движению якоря ЛЭМД. Целью расчетов является сравнение значений электромагнитного усилия, определяемого согласно (7) со значением электромагнитного усилия, найденному по тензору натяжений магнитного поля Максвелла [16] в программной среде COMSOL Multiphysics [17].

Предварительным этапом расчетов являлось определение зависимостей $\psi = f(i; \gamma)$, представленных на рис. 3. При этом магнитные свойства материала магнитопровода ЛЭМД соответствовали свойствам электротехнической стали марки 2013. Переходные характеристики изменения соотношений между током и потокосцеплением в процессе срабатывания получены с помощью математического моделирования в среде Simulink [18] и представлены на рис. 3 (в плоскости тока и потокосцепления) и рис. 4 (во временной плоскости).

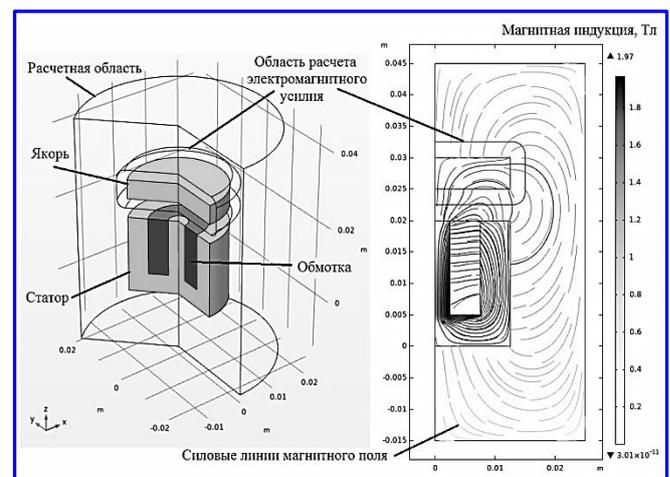


Рис. 2. Конструкция линейного электромагнитного двигателя (частично передний сектор не показан), распределение магнитной индукции и силовые линии магнитного поля

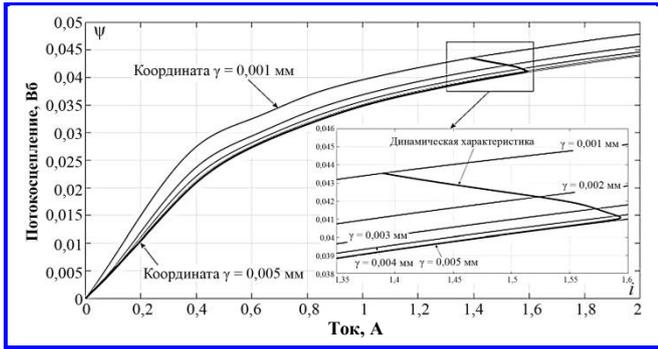


Рис. 3. Семейство статических характеристик намагничивания линейного электромагнитного двигателя и его переходная характеристика срабатывания

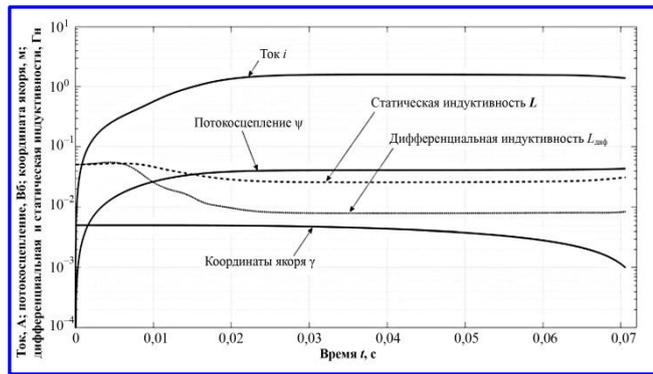


Рис. 4. Динамические характеристики процесса срабатывания линейного электромагнитного двигателя

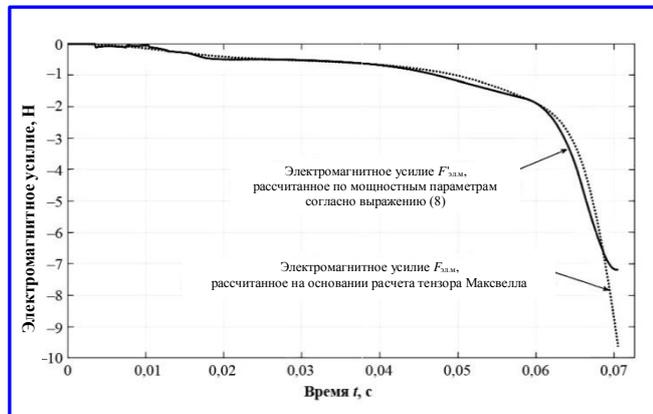


Рис. 5. Динамические характеристики процесса срабатывания линейного электромагнитного двигателя

В дальнейшем рассматривается процесс движения якоря ЛЭМД от 5 до 1 мм рабочего зазора. Напряжение питания ЛЭМД составляло 3,2 В, активное сопротивление обмотки ЛЭМД равно 2 Ом, масса якоря равнялась 0,2 кг. На рис. 4 представлены динамические зависимости тока $i = f(t)$, потокоцепления $\psi = f(t)$, статической $L = f(t)$ и дифференциальной $L_{\text{диф}} = f(t)$ индуктивностей обмотки ЛЭМД в процессе срабатывания, а также координаты якоря ЛЭМД $\gamma = f(t)$ от времени. Процесс сра-

батывания ЛЭМД происходит при существенной степени насыщения стали магнитопровода, что обеспечено соответствующей массой подвижного якоря, сформировавшей значительную силу инерции, которая, в свою очередь, препятствовала срабатыванию ЛЭМД при малых значениях тока.

Определение электромагнитного усилия, действующего на якорь ЛЭМД, произведено в соответствии с предложенной методикой, при этом выражению (7) будет соответствовать следующая запись электромагнитного усилия, записанная в конечных разностях:

$$F'_{\text{эл.м}(j)} = \frac{1}{2} \frac{i_{(j)} L_{(j)}}{\gamma_{(j)} - \gamma_{(j-1)}} \left(\frac{2(\psi_{(j)} - \psi_{(j-1)})}{L_{\text{диф}(j)} + L_{\text{диф}(j-1)}} - (i_{(j)} - i_{(j-1)}) \right), \quad (8)$$

где j – индекс шага расчетов; $L_{\text{диф}}$ – дифференциальная индуктивность, определяющая направление $d\vec{r}_{\text{маг.0}}$ (рис. 1), то есть наклон статической характеристики намагничивания, проходящей через рассматриваемую точку с координатами $(\psi_{(j)}; i_{(j)})$.

На рис. 5 представлено сравнение выражений электромагнитных усилий, рассчитанных в отношении рассматриваемой конструкции ЛЭМД в процессе его срабатывания на основании (8) и на основании расчета электромагнитного усилия $F'_{\text{эл.м}(j)} = f(i_{(j)}; \gamma_{(j)})$ по тензору натяжений магнитного поля Максвелла (электромагнитная теория Максвелла) в программной среде COMSOL Multiphysics. При этом, так как результаты расчета электромагнитного усилия по тензору натяжения Максвелла получены в статическом режиме (якорь ЛЭМД не подвижен), для корректного сравнения $F'_{\text{эл.м}(j)}$ и $F_{\text{эл.м}(j)}$ необходимо учесть силу инерции разгоняющегося якоря, которая, согласно второму закону Ньютона, компенсируется электромагнитным усилием (8), то есть искомый баланс сил запишется следующим образом:

$$F'_{\text{эл.м}(j)} - \frac{1}{2} \frac{m}{\Delta t^2} (\gamma_{(j+1)} - 2\gamma_{(j)} + \gamma_{(j-1)}) = F_{\text{эл.м}(j)}, \quad (9)$$

где m – масса движущегося якоря ЛЭМД. В выражении (8) второе слагаемое учитывает значение силы инерции, действующей на якорь при изменении его скорости. На рис. 5 представлено сравнение выражений электромагнитных усилий, рассчитанных в отношении рассматриваемой конструкции ЛЭМД в процессе его срабатывания на основании (8) и на основании расчета электромагнитного усилия по тензору натяжений магнитного поля Максвелла в программной среде COMSOL Multiphysics.

Абсолютная средняя величина погрешности расчетов электромагнитных усилий составила 3,06%, при среднеквадратичном отклонении – 7,8%. Максимальная погрешность формировалась на конечном этапе срабатывания ЛЭМД и формировалась погрешностью в определении скорости и ускорения движущегося якоря ЛЭМД.

Выводы

Представленная математическая модель позволяет проводить анализ процесса электромеханического преобразования энергии в наиболее общем виде, непосредственно определяя взаимосвязь между балансом силовых моментов на валу машины (за счет определения силового момента, развиваемого машиной) и балансов электрических напряжений в электрическом контуре обмотки возбуждения магнитного поля (за счет определения противо-ЭДС (4)). Выражения магнитной (1) и механической (2) мощностей преобразования энергии можно использовать для формирования алгоритмов расчета динамики рабочих режимов электрических машин на этапах проектирования и эксплуатации.

Литература

1. Телешев Б. А. Необходимые уточнения терминологии в вопросе измерения реактивной мощности / Б. А. Телешев. – Москва : ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ». – Электричество, 1952. – № 11. – С. 72–74.
2. Сидорович А. М. О мгновенной комплексной мощности систем переменного тока / А. М. Сидорович. – Москва : ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ». – Электричество, 1979. – № 11. – С. 12–16.
3. Савиновский Ю. А. Некоторые противоречия теории мощности / Ю. А. Савиновский, А. В. Стратонов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 1984. – № 10. – С. 58–60.
4. Беркович Е. И. К определению понятия мощности в нелинейных цепях / Е. И. Беркович. – Москва : ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ». – Электричество, 1989. – № 1. – С. 61–64.
5. Иванов-Смоленский А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах : Учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Высшая школа, 1989. – 312 с.
6. Сбитнев С. А. Анализ особенностей универсального метода расчета силовых взаимодействий в электромагнитных

полях / С. А. Сбитнев // Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования : сборник статей VII Международной научно-практической конференции. – Пенза : Наука и Просвещение, 2020. – С. 18–21.

7. Пульсации электромагнитного момента бесконтактного двигателя постоянного тока / А. В. Сапсалева, Н. П. Савин, С. А. Харитонов [и др.] // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2018. – № 1. – С. 369–373.
8. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины : учебник для вузов. В двух томах. Том 1 / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2006. – 652 с.
9. Уайт Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – Москва : Энергия, 1964. – 312 с.
10. Кениг Г. Теория электромеханических систем / Г. Кениг, В. Блекуэл. – Москва : Энергия, 1965. – 424 с.
11. Шмитц Н. Л. Введение в электромеханику / Н. Л. Шмитц, Д. В. Новотный. – Москва : Энергия, 1969. – 336 с.
12. Угаров Г. Г. Рабочий цикл электромагнитной ударной машины с аккумулированием магнитной энергии в период холостого хода / Г. Г. Угаров, К. М. Усанов, В. Ю. Нейман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1997. – № 3. – С. 76–80.
13. Вырыханов Д. А. Анализ взаимосвязей электрических контуров в обобщенном электромеханическом преобразователе энергии / Д. А. Вырыханов, Г. Г. Угаров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 33–37.
14. Numerical simulation of the process of sensorless determination of the mechanical power developed by a torque motor / D. A. Vyrykhanov, G. G. Ugarov, V. I. Moshkin [et. al.] // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12 – 14 мая 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012088. – DOI : 10.1088/1742-6596/2032/1/012088.
15. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1973. – 834 с.
16. Тамм И. Е. Основы теории электричества : Учеб. пособие для вузов / И. Е. Тамм. – 11-е изд., испр. и доп. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
17. Introduction to COMSOL Multiphysics : [Введение в COMSOL Multiphysics] // www.comsol.com : [сайт]. – 2023. – 260 p. – URL : <https://cdn.comsol.com/doc/6.1.0.357/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.
18. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс ; Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 288 с.

Поступила в редакцию 06.06.2023

Денис Александрович Вырыханов, кандидат технических наук, доцент, инженер, т. +7 (845) 299-88-72, e-mail: DenverElrond2@yandex.ru. (АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики»).

Геннадий Григорьевич Угаров, доктор технических наук, профессор, т. +7 (845) 228-16-59. (ФГБОУ ВО Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»).

DETERMINATION OF THE MECHANICAL MOMENT DEVELOPED BY AN ELECTRIC MACHINE WITH A NONLINEAR MAGNETIC CIRCUIT

D. A. Vyrykhanov, G. G. Ugarov

The improvement of electric drive systems is associated with the need to calculate the dynamics of work processes, taking into account the nonlinearity of the properties of the magnetic circuit and the transient type of the calculated parameters. Currently, this requires clarification of the issues of determining the torque developed by an electric machine. Based on the proposed mathematical model for determining the balance of electrical, magnetic and mechanical energy conversion capacities, the methodology for determining the force moment is specified. The application of the mathematical apparatus of vector analysis to the scalar function of magnetic energy in the coordinates of current and flow coupling made it possible to find expressions that directly correlate the value of the counter-EMF observed in the electrical circuit to the value of mechanical power. The presented mathematical model is extended to electric machines with an unlimited number of interacting electrical circuits and sources of magnetomotive force. The influence of the degree of saturation of the magnetic circuit of an electric machine on the magnitude of the magnetic energy conversion power in an electric machine is determined. The key value of the ratio of instantaneous values of flow coupling to the current of the electric circuit is shown, which determines its own instantaneous inductance for reactive systems, for analyzing the process of electromechanical energy conversion. The results obtained are compared and complement the classical provisions for determining the torque and mechanical power developed by electric machines.

Keywords: electromechanical energy conversion, torque, mechanical power, saturation of the magnetic circuit, Counter-EMF.

References

1. Teleshev B. A. Necessary clarification of terminology regarding the reactive power measurement / B. A. Teleshov // *Elektrichestvo* journal. – Moscow : National Research University MPEI, 1952. – No. 11. – P. 72–74.
2. Sidorovich A. M. About instantaneous complex power of alternating current systems / A. M. Sidorovich // *Elektrichestvo* journal. – Moscow : National Research University MPEI, 1979. – No. 11. – P. 12–16.
3. Savinovsky Yu. A. Some contradictions in power theory / Yu. A. Savinovsky, A. V. Stratonov // *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations.* – 1984. – No. 10. – P. 58–60.
4. Berkovich Ye. I. About definition of the concept of power in non-linear circuits / Ye. Ye. Berkovich // *Elektrichestvo* journal. – Moscow : National Research University MPEI, 1989. – No. 1. – P. 61–64.
5. Ivanov-Smolensky A. V. Electromagnetic forces and energy conversion in electric machines : Textbook for universities in the specialty ‘Electromechanics’ / A. V. Ivanov-Smolensky. – Moscow : Vysshaya Shkola Publishers, 1989. – 312 p.
6. Sbitnev S. A. Analysis of features of the universal method for calculating force interactions in electromagnetic fields / S. A. Sbitnev // *Innovative development: the potential of science and modern education : Collection of proceedings of VIIIth International research and practical conference.* – Penza : Nauka i Prosveshchenie, 2020. – P. 18–21.
7. Pulsations of electromagnetic torque of a contactless DC motor / A. V. Sapsalev, N. P. Savin, S. A. Kharitonov [et al.] // *Innovative information and communication technologies.* – 2018. – No. 1. – P. 369–373.
8. Ivanov-Smolensky A. V. Electrical Machines : textbook for universities. In two volumes. Volume 1 / A. V. Ivanov-Smolensky. – Moscow : MEI Publishing House, 2006. – 652 p.
9. White D. Electromechanical energy conversion / D. White, H. Woodson. – Moscow : Energia, 1964: 312 p.
10. Koenig H. Electromechanical System Theory / H. Koenig, W. Blackwell. – Moscow : Energia, 1965. – 424 p.
11. Schmitz N. Introductory Electromechanics / N. Schmitz, D. Novotny. – Moscow : Energia, 1969. – 336 p.
12. Ugarov G. G. Operating cycle of an electromagnetic impact machine with the accumulation of magnetic energy during the idle period / G. G. Ugarov, K. M. Usanov, V. Yu. Neyman // *Journal of Mining Science.* – 1997. – No. 3. – P. 76–80.
13. Vyrykhanov D. A. Analysis of interrelations of electrical loops in a generalized electromechanical energy converter / D. A. Vyrykhanov, G. G. Ugarov // *Scientific and Technical Journal ‘Russian Electromechanics,* 2015. – No. 3. – P. 33–37.
14. Numerical simulation of the process of sensorless determination of the mechanical power developed by a torque motor / D. A. Vyrykhanov, G. G. Ugarov, V. I. Moshkin [et. al.] // *Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, May 12 – 14, 2021.* – Novosibirsk, 2021. – P. 012088. – DOI : 10.1088/1742-6596/2032/1/012088.
15. Korn G. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers / G. Korn, T. Korn. – Moscow : Nauka (Science), 1973. – 834 p.
16. Tamm I. Ye. Basics of Electricity Theory : Textbook for universities / I. Ye. Tamm. – 11th edition, corrected and updated. – Moscow : FIZMATLIT, 2003. – 616 p.
17. Introduction to COMSOL Multiphysics : [Introduction to COMSOL Multiphysics] // www.comsol.com : [website]. – 2023. – 260 p. – URL : <https://cdn.comsol.com/doc/6.1.0.357/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.
18. Chernykh I. V. Modeling of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink / I. V. Chernykh. – Moscow : DMK Press ; Saint-Petersburg : Piter, 2008. – 288 p.

Denis Aleksandrovich Vyrykhanov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, engineer, tel.: +7 (845) 299-88-72, e-mail: DenverElrond2@yandex.ru. (JSC «Design Bureau of Industrial Automation»).

Gennady Grigorievich Ugarov, Doctor of Technical Sciences, professor, tel.: +7 (845) 228-16-59. (Kamyshin Technological Institute (branch of) State Educational Institution of Higher Education Volgograd State Technical University KTI (branch of) VSTU).