

Электротехника

УДК 621.318

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МОМЕНТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ОГРАНИЧЕННЫМ УГЛОМ ПОВОРОТА РОТОРА

Ю.Н. Иванников, В.Н. Овсянников *

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: Yura_ivannik@mail.ru, ovsyannikov0512@mail.ru

Аннотация. Моментный двигатель находит широкое применение в устройствах с ограниченным углом поворота ротора. Существует достаточно много конструктивных решений, направленных на повышение эксплуатационных характеристик. Беспазовый моментный двигатель с обмоткой кольцевого типа позволяет получить стабильный момент в пределах рабочего угла поворота ротора, что весьма востребовано в электроприводах угловой стабилизации высокой точности. При этом с целью снижения люфтов сопряжение управляемого механизма с моментным двигателем осуществляется в едином корпусе с использованием прямого привода. Отличительной особенностью двигателей этого типа является наличие относительно большого немагнитного зазора, включающего в себя воздушный зазор и витки обмотки статора. В качестве источников поля в такой конструкции наиболее целесообразно использование высококоэрцитивных постоянных магнитов, за счет применения которых улучшаются массогабаритные показатели и исключаются узлы, связанные с подведением тока к вращающимся частям машины. Наибольшее распространение в последнее время в качестве магнитных материалов получили сплавы NdFeB, магнитные свойства которых существенно зависят от температуры. Таким образом, актуальным становится вопрос определения температурного состояния моментного двигателя на этапе выбора марки используемых постоянных магнитов.

Анализ конструкции моментного двигателя, исполнительного механизма и условий его эксплуатации дает основания предполагать существенное влияние на тепловое состояние машины краевых эффектов, элементов конструкции, схемы питания. В статье с использованием методов численного 3D-моделирования магнитного поля уточнена величина и распределение магнитных потерь в стали и потерь на вихревые токи в постоянных магнитах в результате питания обмоток от широтно-

* Юрий Николаевич Иванников, доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование», кандидат технических наук.

Владимир Николаевич Овсянников, доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование», кандидат технических наук.

импульсного преобразователя. Оценено влияние найденных потерь на тепловое состояние двигателя. Моделирование температурного поля осуществлялось в трехмерной постановке с целью определения степени влияния конструктивных элементов на величину максимальной температуры обмоток и постоянных магнитов. В качестве сравнительного эксперимента было осуществлено плоскопараллельное моделирование с целью определения его применимости в рамках исследования аналогичных моментных двигателей.

Ключевые слова: моментный двигатель, обмотка кольцевого типа, немагнитный зазор, температурное поле, добавочные потери, магнитные потери, потери от широтно-импульсной модуляции, высококоэрцитивные постоянные магниты, прямой привод, трехмерное моделирование.

Моментный двигатель (МД) – электромеханическое устройство, преобразующее электрический сигнал на входе в момент на валу. Широкое применение МД с ограниченным углом поворота получили в наиболее простом случае – в устройствах с двухпозиционным регулированием типа открыто/закрыто в качестве электромеханических вентилях. Совершенствование системы управления с обратной связью расширяет функциональные возможности подобных устройств за счет повышения гибкости управления углом открытия вентиля и повышения динамических характеристик [1]. Особенностью моментных двигателей является работа в режиме упора ротора или его вращения с весьма малой частотой. Такие режимы работы характерны для ряда областей техники, например устройств угловой стабилизации высокой точности, в том числе в качестве бортового оборудования летательных аппаратов, исполнительных механизмов управления роботов и промышленных манипуляторов и т. п. Работа МД в подобных системах предъявляет высокие требования к точности позиционирования. Обычно МД с ограниченным углом поворота ротора изготавливаются на одном валу с исполнительным механизмом, что значительно повышает точность регулирования за счет исключения промежуточных кинематических звеньев (соединительных муфт и редукторов).

Существует множество конструктивных решений, направленных на повышение потребительских качеств МД [2]. Большое распространение получила конструктивная схема с обмоткой кольцевого типа, расположенной на статоре, и постоянными магнитами на роторе (рис. 1). Характерной особенностью данной конструкции является большой немагнитный зазор, основная часть которого занята обмоткой, в результате чего для создания требуемого магнитного потока необходима развитая система возбуждения. В машинах небольшой мощности приемлемые значения магнитной индукции в зазоре могут быть созданы предпочтительно за счет применения высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ). Исключение зубцов статора, с одной стороны, снижает величину магнитной индукции в зазоре, но с другой – позволяет избавиться от зубцовых пульсаций момента, что достаточно важно в прецизионном оборудовании.

Отличительной особенностью моментного двигателя является отсутствие или весьма низкая частота вращения ротора в номинальном режиме работы. Например, моментный двигатель в устройствах с двухпозиционным регулированием или в системе угловой стабилизации после установки требуемой ориентации исполнительного механизма развивает момент на валу, необходимый для сохранения положения ротора. При этом вся электрическая энергия, подводимая к обмоткам возбуждения, преобразуется в тепло, нагревая машину. За счет отсутст-

вия вращающихся деталей затрудняется самовентиляция машины, что приводит к большему по сравнению с вращающимися электрическими машинами удельному расходу материалов.

Наиболее перспективным выглядит применение в качестве возбуждения высококоэрцитивных материалов на основе сплава $NdFeB$ в связи с его высокими энергетическими показателями. Однако существенными недостатками таких магнитных материалов являются значительные отрицательные температурные коэффициенты по индукции и напряженности [3, 4], в связи с чем подход к проектированию электрических машин с возбуждением от ПМ должен учитывать ухудшение эксплуатационных характеристик с повышением температуры. Таким образом, при проектировании электрической машины необходимо принимать магнитные свойства ПМ, соответствующие максимальной рабочей температуре. Так как температура ПМ зависит от компоновки машины и условий охлаждения, то наиболее разумным выглядит подход к проектированию, основанный на методе последовательных приближений при совместном решении магнитной и тепловой задач.

В [2, 5] в результате оптимизационного эксперимента по уменьшению массогабаритных показателей были получены варианты моментного двигателя, на основе которых изготовлены опытные образцы МД–100–1 и МД–6. При этом была проведена многокритериальная оптимизация с использованием функций ограничителей, одной из которых был перегрев обмотки статора. Однако изменение температурозависимых параметров ПМ при этом не учитывалась.

В отечественной и зарубежной научной прессе уделяется внимание совершенствованию методологии исследования и улучшению эксплуатационных характеристик моментных двигателей с обмотками кольцевого типа [2, 6] и с другими конструктивными особенностями [7, 8]. Определенный интерес вызывают работы, направленные на совершенствование системы управления моментными двигателями в различных автоматизированных приложениях [1, 9]. Вопросы оптимизационного проектирования в рамках повышения потребительских качеств моментных двигателей достаточно подробно рассматриваются в исследованиях [2, 10]. Однако в отечественной и зарубежной прессе недостаточно полно рассмотрены вопросы охлаждения моментных двигателей. В [11] было осуществлено численное моделирование МД в двумерной постановке, однако относительно небольшая осевая длина машины вносит ограничения для плоскопараллельного моделирования в связи с увеличением значимости краевых эффектов. В связи с этим остается актуальным вопрос уточнения температурного поля моментного двигателя с учетом его питания от широтно-импульсного преобразователя и влияния на теплообмен элементов корпуса.

Объектом исследования в настоящей работе выступал моментный двигатель с ограниченным углом поворота. За основу взята конструкция [2] МД–100–1 (см. рис. 1). При решении рассмотренных задач использовались численные методы решения полевых задач.

Основным источником тепловыделений в МД является обмотка статора. МД получает питание от широтно-импульсного преобразователя, зачастую без использования фильтрующих элементов в силовых цепях. В результате пульсации тока на частоте ШИМ возникают добавочные потери в железе статора и ротора и в массивных частях моментного двигателя (в том числе в телах ПМ), которые могут достигать значительной величины, в связи с чем их также необходимо учи-

тивать. Для уточнения отмеченных потерь была решена задача нестационарного магнитного поля в трехмерной постановке с использованием специализированного программного обеспечения.

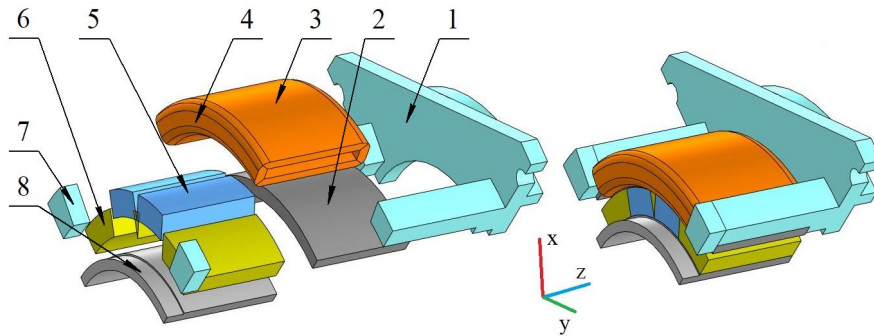


Рис. 1. Геометрическая модель моментного двигателя:

1 – корпус; 2 – магнитопровод статора; 3 – катушка статора; 4 – лобовая часть катушки статора; 5 – постоянные магниты; 6 – фиксирующий состав; 7 – упор; 8 – магнитопровод ротора

Основой математического описания электромагнитных явлений является общая модель Максвелла в частных производных [12]. В случае описания магнитных процессов классических индукционных машин вводится допущение равенства нулю электрических зарядов в рассматриваемой области, что приводит к упрощению модели. При расчете вихревых электромагнитных полей используется понятие векторного магнитного потенциала (\mathbf{A}) [12, 13]. Тогда нелинейная магнитодинамическая модель, выраженная через векторный потенциал, может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}, \\ \text{div} \mathbf{A} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость; σ – удельная электрическая проводимость; \mathbf{J} – вектор плотности тока.

Расчет магнитных потерь в среде моделирования основан на уравнении Штейнмеца и позволяет учитывать перемагничивание по частичным циклам исходя из полученной площади петли гистерезиса, а также вихретоковую компоненту. Материалом магнитопровода была выбрана электротехническая сталь 2412. Магнитные свойства определены соответствующей кривой намагничивания [14], зависимостью удельных потерь от индукции для промышленной частоты, толщиной листа, плотностью и удельной проводимостью [15].

В свойствах катушки статора геометрической модели задана величина магнитной проницаемости, число витков, активное сопротивление, рассчитанное аналитическим методом для прогнозируемой в номинальном режиме работы температуры. Рассматриваемая электрическая машина ориентирована на использование в качестве привода системы ориентации, следовательно, в процессе работы рабочий угол поворота ротора относительно полюса меняет свой знак. Поэтому в качестве источника поля использовалась внешняя цепь, имитирующая мос-

товую схему управления с питанием от источника постоянного напряжения с возможностью изменения скважности сигнала:

$$U_{\kappa} = 2 \cdot U_{\text{ин}} \cdot (k + 0,5), \quad (2)$$

где $U_{\text{ин}}$ – напряжение источника питания; k – скважность сигнала.

Сравнения различных систем электроснабжения ЛА показывают преимущества по массогабаритным показателям трехфазного напряжения 115/200 В переменной частоты с последующим выпрямлением над системой постоянного напряжения 28 В или 112В [16]. Поэтому напряжение источника питания при определении потерь в стали было принято равным 115 В. Несущая частота ШИМ была принята равной $f = 16$ кГц. При такой схеме подключения значительно увеличивается быстродействие МД.

Граничные условия были заданы в виде нормальной составляющей магнитного потенциала на внешней границе расчетной области и условий периодичности на поверхностях, ограничивающих полюсное деление.

Переходный процесс при подключении моментного двигателя к напряжению, соответствующему максимальной нагрузке, в разомкнутой системе управления показан на рис. 2.

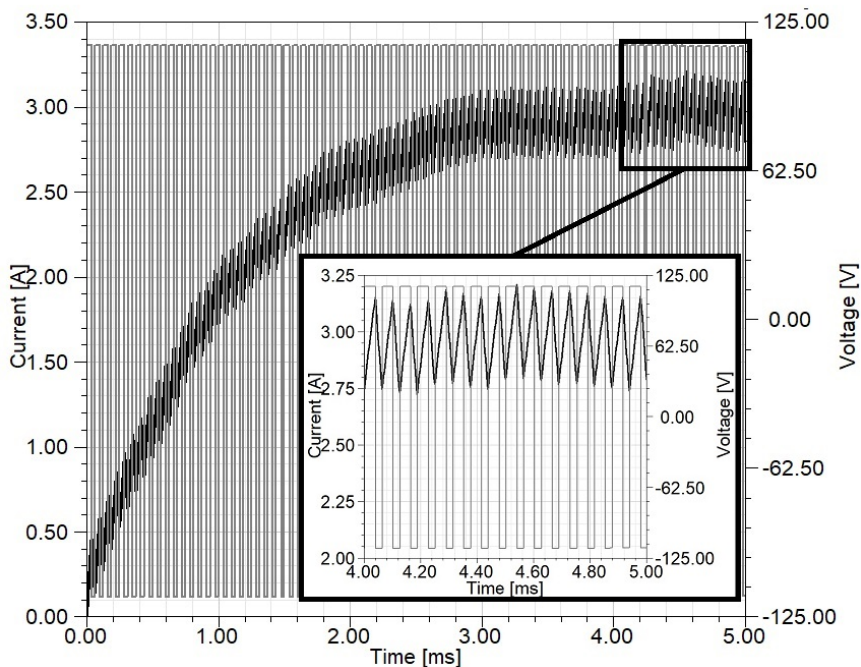


Рис. 2. Переходный процесс в разомкнутой системе

Как видно из рис. 2, при питании катушки МД без фильтрующих элементов в силовой цепи кривая тока в установившемся режиме имеет достаточно существенную величину пульсаций $I_{\text{пуль}} = 0,185$ А.

В результате решения магнитной задачи установлена величина и распределение магнитных потерь в стали статора и ротора и потерь на вихревые токи в массивных частях машины – постоянных магнитах и корпусе – в наиболее нагру-

женном режиме. Полученные данные сведены в табл. 1 и были использованы в качестве источников поля в задаче стационарной теплопроводности.

Величина объемных тепловыделений в активных частях машины определялась выражением, Вт/м³:

$$Q_a = \frac{P_a}{V_a}, \quad (3)$$

где P_a – тепловыделения (Вт), в объеме V_a (м³).

В общем случае для анализа стационарного теплового поля электрической машины используется дифференциальное уравнение теплопроводности [17, 18]

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \frac{P_a}{V_a} = 0, \quad (4)$$

где $\lambda(x, y, z)$ – теплопроводность среды (Вт/м/К).

В тепловом отношении моментный двигатель представляет собой совокупность твердых тел, контактирующих друг с другом и с газообразной (или жидкой) внешней средой. Для расчета температурного поля МД использовалось граничное условие, описывающее изменение теплового потока при контакте двух твердых тел, имеющих соответственно теплопроводности $\lambda_1(x, y, z)$ и $\lambda_2(x, y, z)$:

$$\lambda_1(x, y, z) \cdot \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2(x, y, z) \cdot \frac{\partial T_2}{\partial n}. \quad (5)$$

Интенсивность теплообмена на границе сред $\alpha(x, y, z)_{\text{гр}}$:

$$-\lambda(x, y, z) \frac{\partial T}{\partial n_{\text{сп}}} = \alpha(x, y, z) \cdot (T_{\text{сп}} - T_0). \quad (6)$$

Уравнения (4)–(6) являются основой для численного моделирования стационарных тепловых процессов. Величина объемных тепловыделений была найдена в результате решения магнитной задачи, тогда неизвестными остаются коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи.

Теплопередача через корпус и постоянные магниты мало различается в направлении осей используемой системы координат. Блоки математической модели, соответствующие эти материалам, описаны изотропными коэффициентами теплопроводности.

Теплопередача через воздушный зазор в электрических машинах зависит от конструктивного исполнения ротора (явнополюсный или неявнополюсный), наличия зубчатости, частоты вращения ротора и величины осевой скорости потока в случае аксиальной вентиляции. Режим течения при этом определяется соотношением чисел Рейнольдса по осевой и окружной скоростям [17]. Однако специфика работы моментного двигателя предполагает периоды, в течение которых ротор машины, не имея вращения, развивает номинальный момент. Это наиболее сложный с точки зрения вентиляции режим работы, так как ухудшается теплообмен с поверхности обмотки, обращенной к ротору, и часть теплоты при этом передается менее нагретым постоянным магнитам. Так как величина воздушного зазора достаточно мала (порядка 0,5 мм), то в этом случае теплопередача через воздушный зазор осуществляется преимущественно теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности для воздушного зазора был принят равным теплопроводности воздуха при прогнозируемой температуре.

Обмотки машин в тепловом отношении представляют собой гетерогенные тела со сложным распределением коэффициента теплопроводности. В рассматриваемом МД использовалась рядная намотка катушки виток к витку из N слоев. Теплопроводность упорядоченной (рядной) обмотки в направлении поперек укладки проводников аппроксимирована эквивалентным значением коэффициента теплопроводности [17]:

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda'_{\text{и}} \left(\frac{\arcsin\left(\frac{d}{d_{\text{и}}}\right) \cdot \sqrt{k_3} + 1,57}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{d_{\text{и}}}\right)^2} \cdot k_3} - 1,57 \right), \quad (7)$$

где d , $d_{\text{и}}$ – диаметр голого и изолированного проводника соответственно, (м); k_3 – коэффициент заполнения сечения катушки «по квадратам»; $\lambda'_{\text{и}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности промежутков между жилами, определялся в соответствии с [17].

Эквивалентный коэффициент теплопроводности катушки в направлении намотки проводов, (Вт/м/К):

$$\lambda_3 = \lambda_{\text{м}} \cdot k_{\text{зап}}, \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности меди; $k_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения сечения катушки медью.

Так как в предельном случае ротор МД неподвижен, коэффициент теплоотдачи с теплоотдающей поверхности соответствует спокойному состоянию и был определен с использованием методов теории подобия. Опытные данные для электрических машин с малым уровнем вибраций и без выходного конца вала согласно [17] аппроксимированы зависимостью

$$\text{Nu} = 0,725 \cdot \text{Gr}^{0,225}, \quad (9)$$

где Gr – число Грасгофа [17]:

$$\text{Gr} = \frac{\gamma_{\text{в}}^2 \cdot a \cdot \beta_{\text{в}} \cdot \Delta T \cdot l_0^3}{\mu_{\text{в}}^2}, \quad (10)$$

где $\gamma_{\text{в}}$, $\mu_{\text{в}}$, $\beta_{\text{в}}$ – плотность, коэффициент динамической вязкости, коэффициент объемного расширения среды; a – ускорение массовых сил; ΔT – подогрев; l_0 – характерный линейный параметр. Тогда коэффициент теплоотдачи с поверхности, (Вт/м²/К):

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{в}}}{l_0}. \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса согласно (10), (11) зависит от превышения температуры корпуса над температурой окружающей среды, в качестве граничных условий задавалось среднее значение коэффициента теплоотдачи для рассматриваемой температуры.

Теплофизические свойства блоков геометрической модели, рассчитанные по (3), (7) и (8), сведены в табл. 1.

Теплофизические свойства блоков геометрической модели

Позиция рис. 1	Конструкционная единица	Материал	Теплопроводность, Вт/м/К			Источник поля, Вт/м ³
			λ_x	λ_y	λ_z	
1, 7	Корпус, упоры	Д16Т	130	130	130	–
2	Магнитопровод статора	2412	20	20	3	$4,08 \cdot 10^4$
3	Обмотка статора	Медь / про- водниковая изоляция / пропиточный состав	0,254	0,254	142	$1,76 \cdot 10^6$
4	Лобовая часть обмотки статора		142	0,254	0,254	$1,76 \cdot 10^6$
5	Постоянный маг- нит	N38H	8	8	8	$3,99 \cdot 10^4$
6	Фиксирующий состав	Damival	0,89	0,89	0,89	–
8	Магнитопровод ротора	2412	20	20	3	$3,91 \cdot 10^4$

В результате моделирования температурного поля моментного двигателя было установлено, что наибольшая температура в режиме максимальной нагрузки ($T_{\max} = 233 \text{ }^\circ\text{C}$) превышает установленное классом нагревостойкости используемых изоляционных материалов значение, что неприемлемо. Так как системы охлаждения в рассматриваемом устройстве не предусмотрено, то было установлено, что при снижении значения токовой нагрузки на 33 % достигается требуемая величина максимального превышения температуры (рис. 3, а).

Далее было оценено влияние корпуса и магнитных потерь, обусловленных питанием от широтно-импульсного преобразователя, на температурное поле машины. Для сравнения также была решена задача температурного поля в двумерной постановке. В качестве плоскопараллельной геометрической модели было использовано сечение машины в средней части обмотки согласно рис. 1. Результаты моделирования представлены на рис. 3 и 4 и в табл. 2.

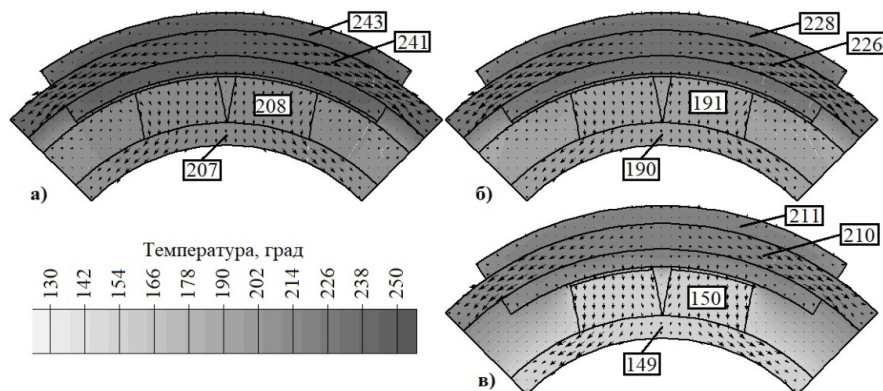


Рис. 3. Температурное состояние моментного двигателя в зависимости от учета магнитных потерь и наличия фиксирующего состава в условиях естественной конвекции

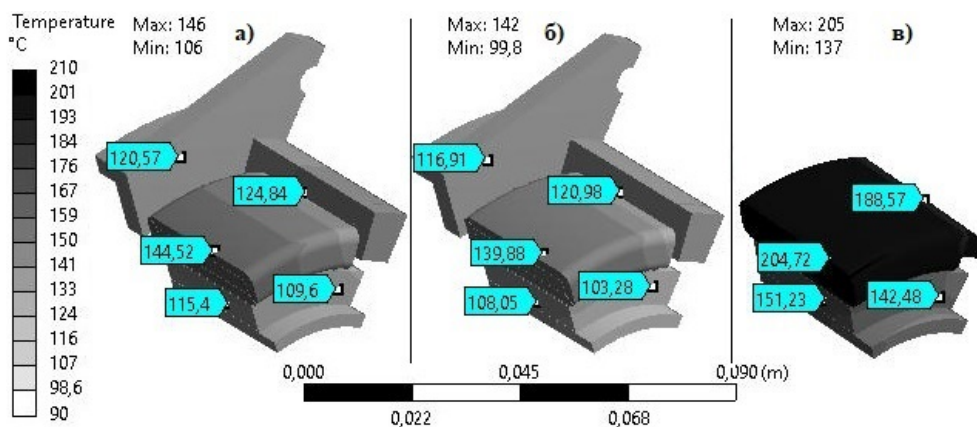


Рис. 4. Температурное состояние моментного двигателя в зависимости от учета магнитных потерь и наличия корпуса в условиях естественной конвекции

Таблица 2

Сравнение максимальной температуры в ключевых точках машины

№ п/п		Температура, °C						
		3D постановка				2D постановка		
		Рис. 4, <i>а</i>	Рис. 4, <i>б</i>	Рис. 4, <i>в</i>		Рис. 3, <i>а</i>	Рис. 3, <i>б</i>	Рис. 3, <i>в</i>
	Корпус	да	да	нет	да	нет	нет	нет
	Потери в стали	да	нет	да	да	да	нет	да
	Фиксирующий состав	да	да	да	нет	да	да	нет
1	Обмотка	146	142	205	142	243	228	211
2	ПМ	115	108	151	99	208	191	150
3	Магнитопровод статора	125	121	200	121	241	226	210
4	Магнитопровод ротора	110	103	150	97	207	190	149
5	Корпус	121	118	–	117	–	–	–

На основании анализа результатов численного моделирования задачи температурного поля исследуемого моментного двигателя в двумерной и трехмерной постановке (рис. 3, 4 и табл. 2) установлено:

1. В заданных габаритах и в условиях естественной конвекции с коэффициентом теплоотдачи, определяемым по (10), (11), максимальная мощность, развиваемая двигателем, должна быть снижена на 30 % в связи с превышением максимальной температуры заданного класса нагревостойкости изоляционных материалов.

2. Результаты численного моделирования задачи в двумерной постановке неплохо согласуются с трехмерным моделированием в случае пренебрежения внешними конструктивными элементами машины (как правило, исследуемые моментные двигатели являются встраиваемыми машинами и не имеют собственного корпуса) и исполнения ротора без фиксирующих элементов (поз. б на рис. 1).

3. Пренебрежение конструктивными элементами при решении задачи температурного поля недопустимо, так как введение корпуса существенно снижает максимальную температуру обмоток и постоянных магнитов (в рассматриваемом случае на 59 и 36 °С соответственно) в связи с существенным увеличением теплоотдающей поверхности в условиях естественной конвекции.

4. Установлены относительно малые превышения максимальной температуры обмотки над температурой корпуса (порядка 25 °С) в условиях естественной конвекции, в связи с чем ожидается дополнительное влияние на температурное поле машины других конструктивных элементов, не учтенных рассматриваемой геометрической моделью.

5. Максимальная температура магнитов в режиме максимальной нагрузки достигает 115 °С, что соответствует температурному индексу 120 °С магнитных сплавов NdFeB.

6. Магнитные потери в стали и на вихревые токи в теле постоянных магнитов от несущей частоты широтно-импульсной модуляции дополнительно увеличивают максимальную температуру обмотки и постоянных магнитов на 4 и 7 °С соответственно.

7. Наличие фиксирующего состава (поз. 6 на рис. 1) негативно влияет на температурное состояние ротора, исключение отмеченного элемента дополнительно снижает температуру обмотки статора и постоянных магнитов на 4 и 16 °С соответственно.

Таким образом, в моментных двигателях рассматриваемой конструкции выгодно использование высококоэрцитивных постоянных магнитов, которые зачастую имеют существенные температурозависимые магнитные характеристики, в связи с чем их выбор сопряжен с определением максимальной температуры. По конструкции и режиму работы моментный двигатель существенно отличается от традиционных электрических машин. Как правило, моментные двигатели являются короткими электрическими машинами, встраиваемыми в корпус исполнительного механизма. В связи с этим существенно влияние внешних конструктивных элементов на температурное состояние машины. Поэтому в процессе тепловых расчетов актуально использование численных методов в трехмерной постановке с учетом конструктивных элементов исполнительного механизма: вала, корпуса и т. п.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ching-Chin Tsai, Shui-Chun Lin, Hsu-Chin Huang, Yu-Ming Cheng.* Design and control of brushless DC limited-angle torque motor with its applications to fuel control of small-scale gas turbine engines // *Mechatronics*, 2009. Vol. 19. Pp. 29–41.
2. *Овсянников В.Н.* Моментный двигатель с ограниченным углом поворота ротора: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 180 с.
3. ГОСТ Р 52956-2008. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим – железо – бор. Классификация. Основные параметры. М.: Стандартинформ, 2008.
4. *McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R., Kramer M.J., Anderson I.E.* Practical aspect of modern and future permanent magnets. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2014. 44:451-77. Pp. 451–477. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070813-113457
5. *Овсянников В.Н., Левина Г.Ж.* Оптимизация моментных двигателей с постоянными магнитами // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VIII научно-практической конференции. Саратов, 2017. С. 192–193.
6. *Nasiri Zarandi R., Meshgin Kelk H., Toorani F., Farahmandzad H.* Comprehensive design of toroidally-wound limited angle torque motor // *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, 2011. Vol. 6, no. 1. Pp. 198–206.

7. *Guodong Y., Jibin Z., Yongxiang X., Yong L., Jianhui H., Qian W.* Torque Performance Improvement of a Radial-Flux Slotted Limited-Angle Torque Motor by Tapered Tooth-Tip // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26, № 7. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2016.2594807
8. *Dolgih A.G., Martemyanov V.M.* Parameters of the torque motor tape winding // International Siberian Conference on Control and Communication (SIBCON), Moscow, Russia, 2016. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491844
9. *Jagadeeshwaran, Ardhanari S., Padm, S., Vijay Shankar, Periyasamy V.M., and Selvakumar P.* Development of Limited Angle Brushless Torque Motor Control Drive for Scan Mirror Mechanism // International Journal of Engineering and technology, 2013. Vol. 5, № 5. Pp. 3907–3913. https://www.researchgate.net/publication/290300677_Development_of_Limited_Angle_Brushless_Torque_Motor_Control_Drive_for_Scan_Mirror_Mechanism (accessed March 1, 2022).
10. *Roohnavazfar M., Houshmand M., Nasiri Zarendi R., Mirsalim M.* Optimization of design parameters of a limited angle torque motor using analytical hierarchy process and axiomatic design theory // Production & Manufacturing Research. 2014. Vol. 2, № 1. Pp. 400–414. DOI: 10.1080/21693277.2014.904762
11. *Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н., Овсянников В.Н.* Исследование теплового состояния моментного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2019. Т. 62, № 4. С. 36–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2019-4-36-43>
12. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. 10-е изд., испр. М.: Наука, 1989. 504 с.
13. *Копылов И.П.* Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
14. *Копылов И.П.* Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов. Под ред. И.П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.
15. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия (с Изменениями N 1-5, с Поправкой). М.: ИПК Издательство стандартов, 1984. 10 с.
16. *Злочевский В.С.* Системы электроснабжения пассажирских самолетов. М.: Машиностроение, 1971. 376 с.
17. *Борисенко А.И.* Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
18. *Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H.* A heat transfer textbook. Cambridge, Massachusetts, USA, 2001. 688 p.

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2022 г.

INVESTIGATION OF THERMAL FIELD OF THE LIMITED-ANGLE TORQUE MOTOR

*Yu.N. Ivannikov, V.N. Ovsyannikov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

E-mail: Yura_ivannik@mail.ru, ovsyannikov0512@mail.ru

Abstract. *A limited-angle torque motor is the electrical motor which be used in applications with specific requirement of shaft torque. The particularities of work of torque motor are high stability of shaft torque within operating angle. This singularity is based on used of ring winding and smooth-core armature construction. That decrease torque ripple and increase accuracy of rotor position control. These key points do a torque motor required in applications of high accuracy angular stabilization. For example, they are vehicle-born equipments, actuating unit of robots, industrial manipulators and so on.*

Used ring winding and smooth-core armature lead to increase non-magnetic gap and thereby to complication design of excitation system. Under such conditions for creation required gap flux density use rare-earth permanent magnets. Nd-based magnetic alloys achieved prevalent recently and often they use in electrical machines. Vital limitation these alloys are high temperature dependency that require calculation a temperature field at the stage of magnets choice. Moreover design of torque motor represents embedded system which have single shaft that decrease of backlash and single housing with actuating unit. For control of torque a torque motor have variable supply source which change out voltage by means of pulse-width modulation. Therefore calculation of temperature field with account for magnetic losses and eddy current loss in magnets caused by used pulse-width modulation, single housing is relevant objective for advance of characteristics of torque motor.

The paper presents results of numerical simulation of transient magnetic task and steady-state heat transfer task. Consequently decision of transient magnetic task was got quantity and distribution magnetic losses in the core and eddy current loss in permanent magnets of torque motor caused by pulse-width modulation. These results were used in the capacity of initial condition in task of steady-state heat transfer. As part of steady-state heat transfer task was specified influence magnetic losses and presence housing over temperature field. Steady-state heat transfer task was modeling in 2D and 3D statement. Through analysis and comparison of results 2D and 3D statement was got limitations of 2D statement in terms of concerned torque motor.

Keywords: *torque motor, ring winding, non-magnetic gap, temperature field, added losses, magnetic losses, magnetic losses caused by pulse-width modulation, high-coercivity permanent magnets, direct drive, 3D simulation.*

REFERENCES

1. *Ching-Chin Tsai, Shui-Chun Lin, Hsu-Chin Huang, Yu-Ming Cheng.* Design and control of brushless DC limited-angle torque motor with its applications to fuel control of small-scale gas turbine engines // *Mechatronics*, 2009. Vol. 19. Pp. 29–41.
2. *Ovsyannikov V.N.* Momentnyj dvigatel' s ogranichennym uglom povorota rotora: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.01. Samara: samar. gos. tekhn. un-t, 2014. 180 p.

* *Yuri N. Ivannikov (PhD (Techn.)), Associate Professor.*
Vladimir N. Ovsyannikov (PhD (Techn.)), Associate Professor.

3. GOST R 52956-2008. Materialy magnitotverdye spechennye na osnove splava neodim-zhelezobor. Klassifikaciya. Osnovnye parametry. M.: Standartinform, 2008.
4. *McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R., Kramer M.J., Anderson I.E.* Practical aspect of modern and future permanent magnets. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2014. 44:451-77. Pp. 451–477. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070813-113457
5. *Ovsyannikov V.N., Levina G.Zh.* Optimizatsiya momentnykh dvigatelei s postoyannymi magnitami // *Aktual'nye problemy energetiki APK Materialy VIII nauchno-prakticheskoi konferentsii.* Saratov, 2017. Pp. 192–193.
6. *Nasiri Zarandi R., Meshgin Kelk H., Toorani F., Farahmandzad H.* Comprehensive design of toroidally-wound limited angle torque motor // *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, 2011. Vol. 6. № 1. Pp. 198–206.
7. *Guodong Y., Jibin Z., Yongxiang X., Yong L., Jianhui H., Qian W.* Torque Performance Improvement of a Radial-Flux Slotted Limited-Angle Torque Motor by Tapered Tooth-Tip // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* 2016. Vol. 26. № 7. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2016.2594807
8. *Dolgih A.G., Martemyanov V.M.* Parameters of the torque motor tape winding // *International Siberian Conference on Control and Communication (SIBCON)*, Moscow, Russia, 2016. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491844
9. *Jagadeeshwaran, Ardhanari S., Padm S., Vijay Shankar, Periyasamy V.M., and Selvakumar P.* Development of Limited Angle Brushless Torque Motor Control Drive for Scan Mirror Mechanism // *International Journal of Engineering and technology*, 2013. Vol. 5, no. 5. Pp. 3907–3913. https://www.researchgate.net/publication/290300677_Development_of_Limited_Angle_Brushless_Torque_Motor_Control_Drive_for_Scan_Mirror_Mechanism (accessed March 1, 2022).
10. *Roohnavazfar M., Houshmand M., Nasiri Zarandi R., Mirsalim M.* Optimization of design parameters of a limited angle torque motor using analytical hierarchy process and axiomatic design theory // *Production & Manufacturing Research.* 2014. Vol. 2, № 1. Pp. 400–414. DOI: 10.1080/21693277.2014.904762
11. *Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N., Ovsyannikov V.N.* Issledovanie teplovogo sostoyaniya momentnogo dvigatelya s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnetov // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika*, 2019. V. 62, № 4. Pp. 36–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2019-4-36-43>
12. *Tamm I.E.* Osnovy teorii elektrichestva. M.: Nauka, 1989. 504 p.
13. *Kopylov I.P.* Elektricheskie mashiny. M.: Energoatomizdat. 1986. 360 p.
14. *Kopylov I.P.* Proektirovanie elektricheskikh mashin. M.: Energiya. 1980. 496 p.
15. GOST 21427.2-83. Stal' elektrotekhnicheskaya holodnokatanaya izotropnaya tonkolistovaya. Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniyami N 1–5, s Popravkoj). M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 1984. 10 p.
16. *Zlochevskii V.S.* Sistemy elektrosnabzheniya passazhirskikh samoletov. M.: Mashinostroenie, 1971. 376 p.
17. *Borisenko A.I.* Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin. M.: Energoatomizdat, 1983. 296 p.
18. *Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H.* A heat transfer textbook. Cambridge, Massachusetts, USA, 2001. 688 p.