

УДК 621.3

А.В. Улюшкин¹, И.В. Трехонин²**МОДЕРНИЗАЦИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Арзамасский приборостроительный завод им. П.И. Пландина²

Обоснована актуальность модернизации бесконтактного электродвигателя; проведено моделирование его работы. Определена основная проблема работы электродвигателя: невозможность обеспечения требуемой нагрузочной характеристики в рамках классической конструкции. Рассмотрены варианты решения данной проблемы: применение редуктора с переменным коэффициентом передачи и применение электродвигателя с переменным коэффициентом ЭДС. Проведено моделирование редуктора с переменным коэффициентом передачи (различные варианты включения обмоток электродвигателя), по итогам которого был сделан выбор технического решения, удовлетворяющего предъявляемым требованиям.

Ключевые слова: вентильный электродвигатель, двигатель постоянного тока, привод летательного аппарата, моделирование, ANSYS Maxwell, ANSYS Maxwell Circuit Editor.

Современные летательные аппараты используют большое число различных исполнительных механизмов и систем, работа которых связана с затратами механической энергии. Приведение в действие и управление их движением обеспечивается приводом, который представляет собой механическую систему, состоящую из защитной аппаратуры, аппаратуры управления этим двигателем и передаточного устройства.

Представленные на отечественном рынке электродвигатели не способны обеспечить нагрузочную характеристику (рис. 1), удовлетворяющую современным требованиям к силовым агрегатам.

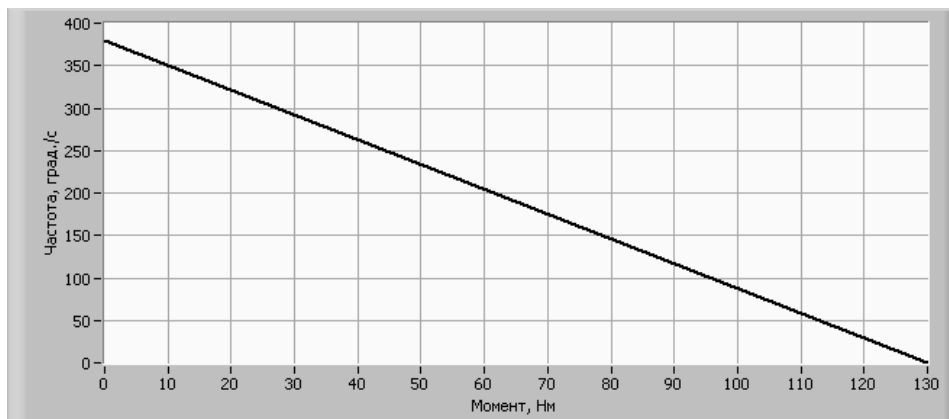


Рис. 1. Нагрузочная характеристика привода

Для управления приводами летательного аппарата используют различные электродвигатели. Они играют немаловажную роль в управлении летательным аппаратом. Поскольку для рулевых приводов требуются двигатели постоянного тока, возможны два варианта: коллекторные двигатели постоянного тока с возбуждением или вентильные двигатели (рис. 2).

Преимуществом коллекторных двигателей является их низкая цена, а преимущество вентильных заключается в том, что эксплуатация таких моторов освобождает сразу от таких проблем, как замена пружин, якоря, щеток, коллекторов. Поэтому наиболее перспективным вариантом в данном случае является использование бесконтактного синхронного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами (класс вентильных электродвигателей).

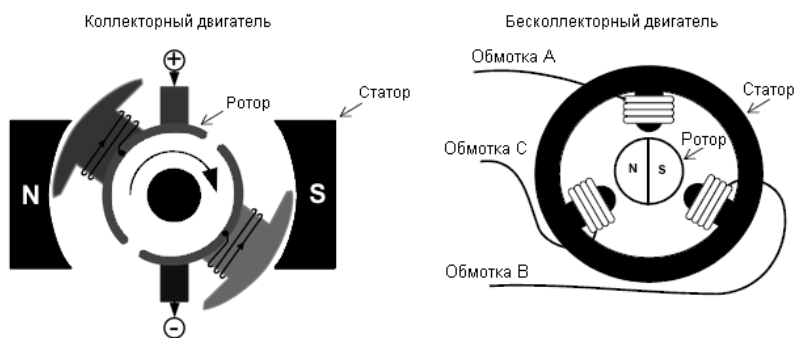


Рис. 2. Устройства коллекторного и бесколлекторного двигателей [2]

Двигателем, в большей мере отвечающим требованиям по габаритным размерам и мощностным характеристикам, является электродвигатель ДМБ. Внешний вид его представлен на рис. 3.

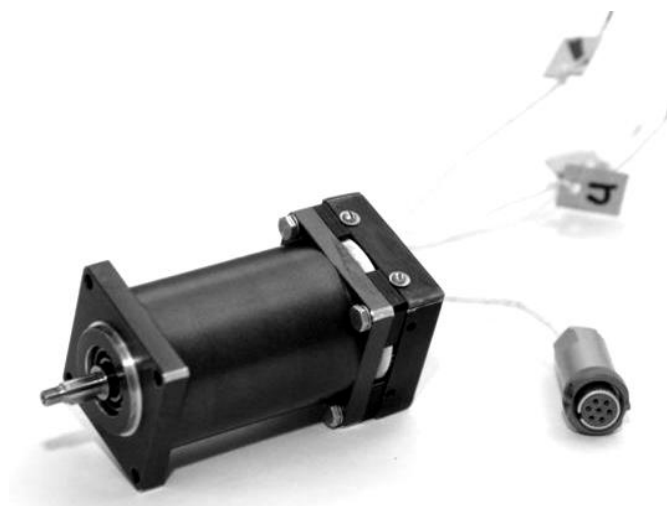


Рис. 3. ДМБ

Известно, что проектирование различных устройств, в том числе – электрических машин – значительно упрощается с помощью прикладных программ, позволяющих проводить моделирование физических процессов. Поэтому в качестве инструмента анализа и поиска необходимого решения поставленной задачи модернизации бесконтактного электродвигателя был принят *ANSYS Maxwell*.

С помощью моделирования проведена оценка работы модернизированного двигателя без изменений конструкции рабочего экземпляра. Создав модель электродвигателя, мы можем на основе его конструкции (рис. 4) анализировать направление магнитных полей внутри нее (рис. 5), а также наблюдать за их напряженностью (рис. 6). Полученная информация необходима для проведения дальнейших расчетов нагрузочной характеристики и других параметров электродвигателя.

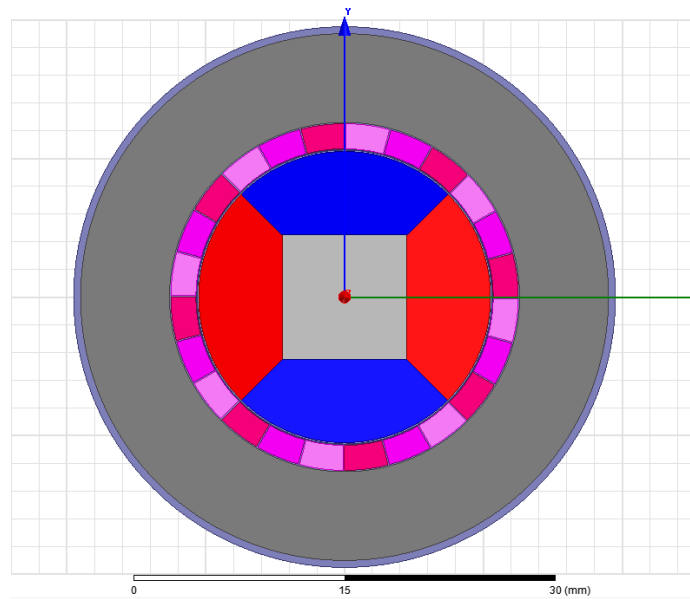


Рис. 4. Общий вид модели ДБМ в ANSYS Maxwell

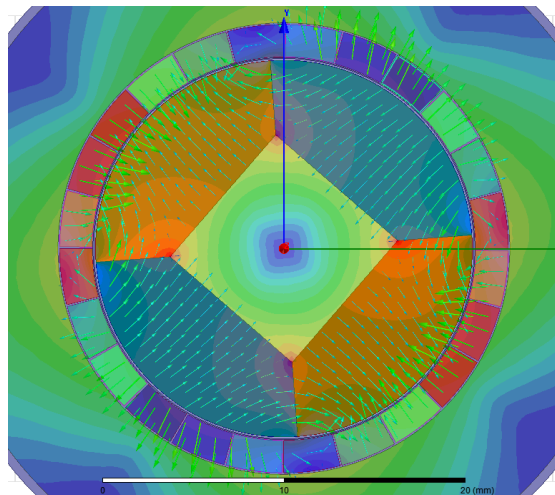


Рис. 5. Магнитные поля внутри ДБМ

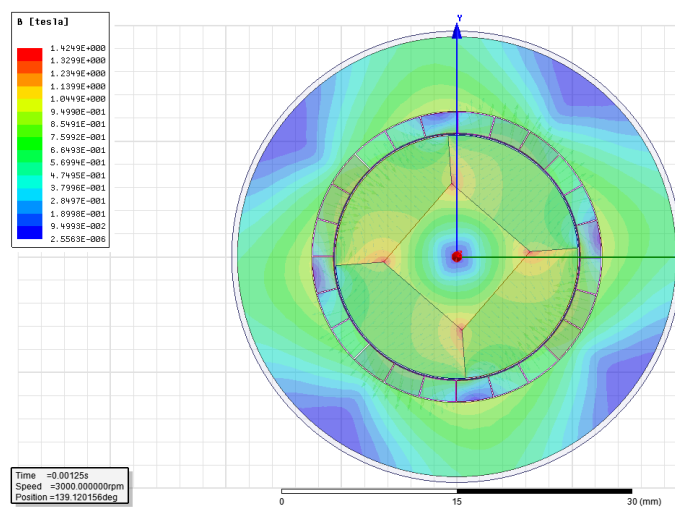


Рис. 6. Магнитные поля внутри ДБМ

В качестве примера на рис. 7 приведены механические характеристики рулевого привода, питающегося от источника питания напряжением 57 В и током 7,5 А с коэффициентом ЭДС электродвигателя $k_E = 0,07$ и сопротивлением фазы $R = 0,675$ Ом при передаточном отношении механической передачи $i = 0,0082$ (график 2) и $i = 0,0033$ (график 3).

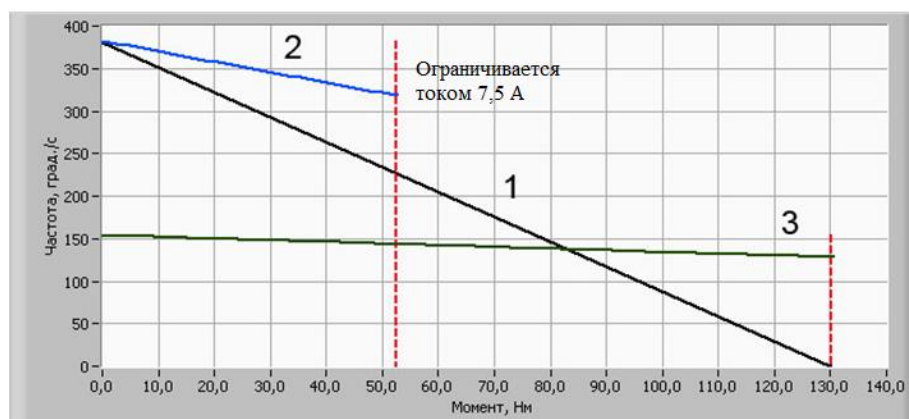


Рис. 7. Механические характеристики рулевого привода

- 1 – требуемая нагрузочная характеристика,
- 2 – нагрузочная характеристика при питании $U = 57$ В, $I = 7,5$ А и передаточном отношении $i = 0,0082$,
- 3 – нагрузочная характеристика при питании $U = 57$ В, $I = 7,5$ А и передаточном отношении $i = 0,0033$

При передаточном отношении $i = 0,0082$ ($k = 122$) достигается угловая скорость 380 град/с, и момент рулевого привода 52,5 Нм (ограничиваемый током 7,5 А), тогда как требуется момент 130 Нм (рис. 7, график 2). При передаточном отношении $i = 0,0033$ ($k = 303$) достигаются максимальный момент 130 Нм и максимальная угловая скорость 153 град/с, тогда как требуется 380 град/с (рис. 7, график 3). Изменение коэффициента ЭДС электродвигателя влияет на механическую характеристику привода так же, как изменение передаточного отношения механической передачи.

Таким образом, изменение параметров рулевого привода АМРП-985С не позволяет, без изменения параметров системы управления, реализовать заданную механическую характеристику. Существует два пути решения данной проблемы (без изменения параметров источников электропитания):

- 1) применение редуктора с переменным коэффициентом передачи;
- 2) применение электродвигателя с переменным коэффициентом ЭДС.

Применение редуктора с переменным коэффициентом передачи фактически означает разработку автоматической коробки перемены передач. Это приводит к увеличению размера, веса, стоимости электропривода, что непозволительно в отношении к приводу АМРП-985С из-за его малых размеров. Помимо этого, подобная разработка потребует применения инновационной конструкции, не использовавшейся ранее, а также сложной технологии производства. В любом случае усложненная конструкция снижает надежность изделия. Коэффициент ЭДС электродвигателя зависит от конструкции электродвигателя (обмоток двигателя, видов их соединений, количества пар полюсов, материалов магнитов и др.) Для электродвигателя с фиксированным расположением обмоток коэффициент ЭДС – величина постоянная. Но, варьируя параметры обмоток, можно задавать коэффициент ЭДС электродвигателя.

Предлагаемый способ обеспечить электрическую двухскоростную трансмиссию состоит в использовании в обмотке статора двух обмоток на каждую фазу. Это позволит коммутировать их последовательно или параллельно, как показано на рис. 8.

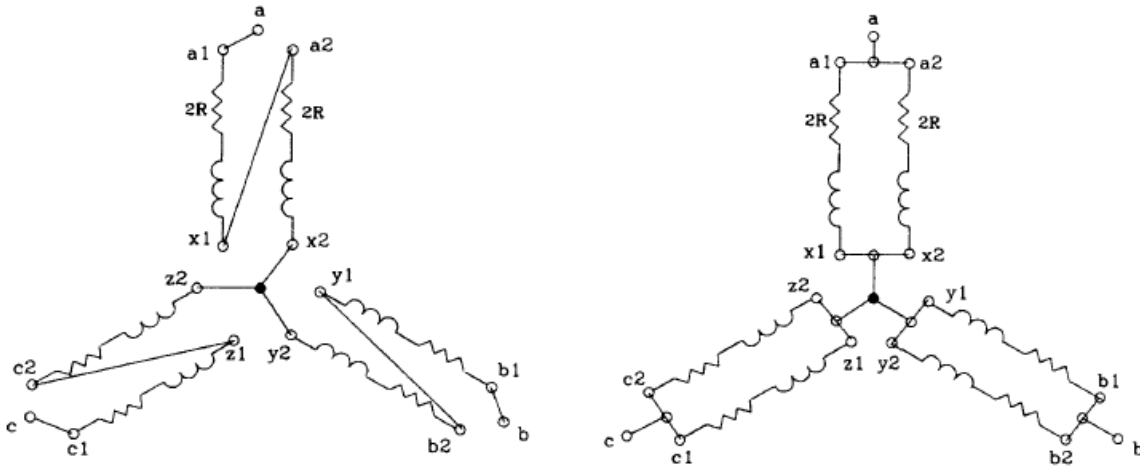


Рис. 8. Последовательное и параллельное соединение обмоток электродвигателя [6]

Другой способ коммутации обмоток – соединение в звезду или треугольник (рис. 9).



Рис. 9. Соединение обмоток двигателя звездой, треугольником [6]

Для моделирования параметров была создана приближенная модель электродвигателя ДБМ с использованием ПО *ANSYS Maxwell 2D*. В созданной модели представлены все три варианта соединения катушек электродвигателя [3]. Для соединения обмоток модели электродвигателя ДБМ последовательно, параллельно, треугольником использовалось программное обеспечение *ANSYS Maxwell Circuit Editor*, к зажимам обмоток подключались вольтметры. Вращение электродвигателя и моделирование напряжений на зажимах производилось в *ANSYS Maxwell 2D* [5]. Схемы соединения обмоток и результаты моделирования представлены на рис. 10. Скорость вращения электродвигателя – 3000 об/мин.

Таким образом, используя переключение обмоток, можно добиться большого крутящего момента на низких оборотах при последовательном включении и вдвое увеличить максимальную скорость при параллельном включении. Похожая зависимость наблюдается при переключении «звезда-треугольник».

Возможны два варианта переключения схем соединения обмоток, с помощью которых можно выполнить требования ТЗ на нагрузочную характеристику рулевого привода: переключение с параллельного на последовательное соединение, переключение с схемы «треугольник» на последовательное соединение.

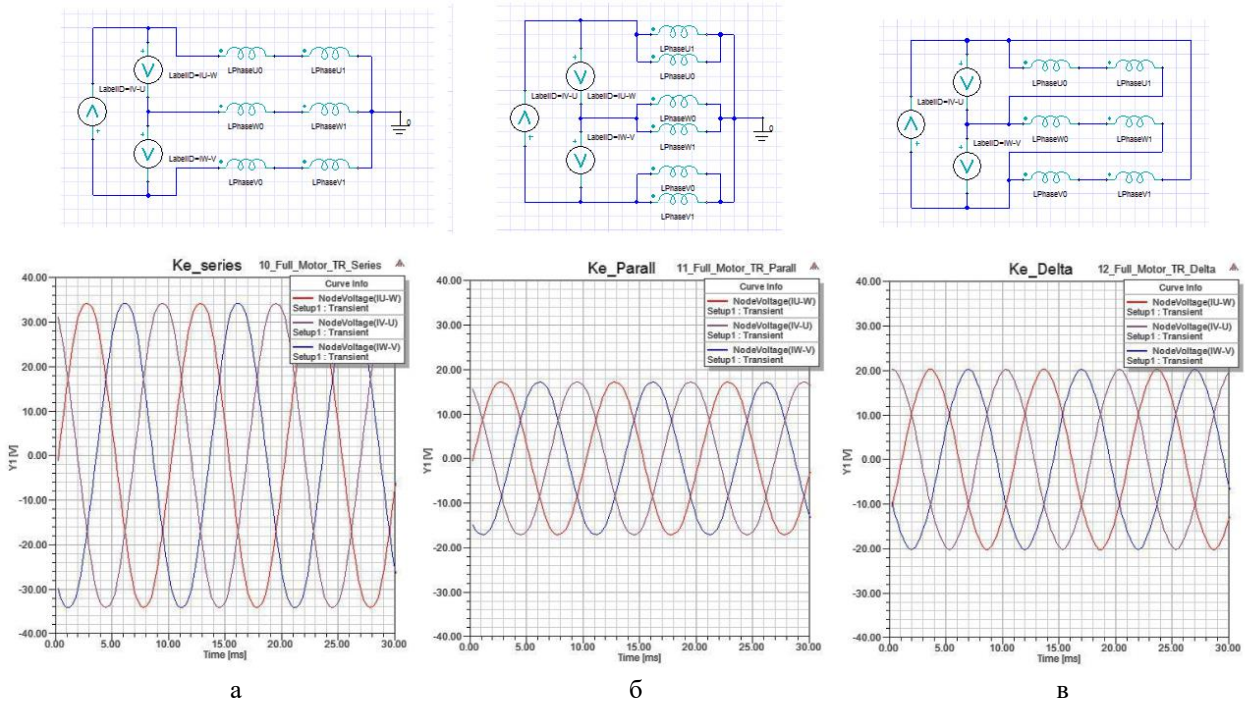


Рис. 10. Схемы подключения обмоток (верхний ряд) и наведенное напряжение в фазах (нижний ряд)

а – последовательное соединение обмоток, б – параллельное, в – треугольник

Таким образом, нагрузочная характеристика привода с учетом переключения схем соединения обмоток выглядит следующим образом (рис. 11,12).

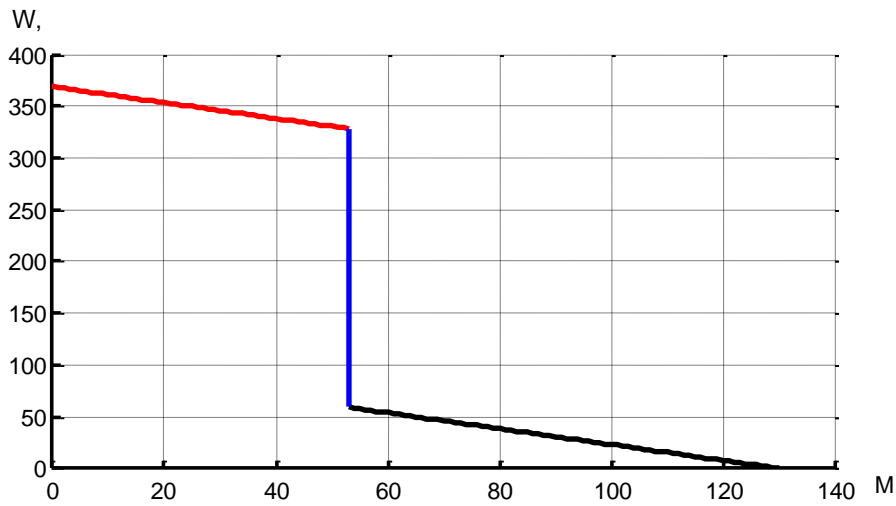


Рис. 11. Нагрузочная характеристика привода при переключении с параллельного на последовательное соединение обмоток

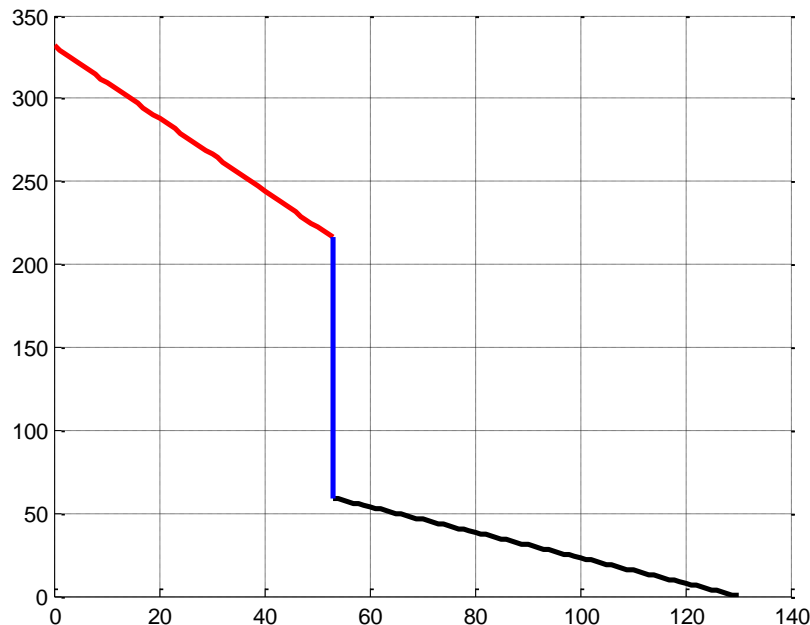


Рис. 12. Нагрузочная характеристика привода при переключении со схемы «Треугольник» на последовательное соединение обмоток

На основании полученных графиков можно сделать вывод, что при переключении с параллельного на последовательное соединение обмоток (рис. 11) обеспечивается требуемая нагрузочная характеристика, а именно: на холостом ходу угловая скорость вращения достигает до 380 град/с, а при приложении нагрузки максимальный момент достигает минимального необходимого уровня 130 Нм и превышает его. При переключении со схемы «треугольник» на последовательное соединение (рис. 12), максимальный момент достигает минимального необходимого уровня 130 Нм, но угловая скорость вращения на холостом ходу достигает 330 град/с, что не обеспечивает требуемые показатели работы модернизированного бесконтактного двигателя.

Данные результаты свидетельствуют о том, что схема параллельного соединения обмоток может обеспечить лишь необходимую угловую скорость вращения на холостом ходу, но не может обеспечить максимальный момент при приложении нагрузки (ограничение батарей с допустимым током 7,5 А). Схема соединения треугольником обеспечивает максимальную угловую скорость вращения лишь 330 град/с, что недостаточно для выполнения ТЗ, а момент также ограничен из-за питания 7,5 А. Поэтому единственный вариант исполнения схемы управления – это переключение между параллельным и последовательным соединением обмоток электродвигателя ДБМ.

Библиографический список

1. **Кенио, Т.** Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / Т. Кенио, С. Нагамори. – М.: Энергоатомиздат, 1989, – 184 с.
2. **Микеров, А.Г.** Управляемые вентильные двигатели малой мощности / А.Г. Микеров. – СПб.: СПбГЭТУ, 1997, – 64 с.
3. **Липай, Б.Р.** Компьютерные модели электромеханических систем / Б.Р. Липай, С.И. Маслов. – М.: МЭИ, 2002, – 79 с.
4. **Huang Hong** Electrical Two-Speed Propulsion by Motor Winding Switching and Its Control Strategies for Electric Vehicles / Hong Huang, Liuchen // Chang IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, – 77 с.

5. **Hendershot, J.R.** Design of brushless permanent-magnet motors, Monographs in electrical and electronic engineering / J.R. Hendershot Jr, TJE Miller // Magna physics publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994, – 157 с.
6. **Tian, B.** Investigation of Dual-Inverter-Fed Drives for Permanent Magnet Synchronous Motor with Winding Switching / B. Tian, Z. Zhang, T.A. Lipo // University of Wisconsin-Madison College of Engineering Wisconsin Power Electronics Research Center, 2014, – 35 с.

*Дата поступления
в редакцию: 30.04.2019*

A.V. Ulyushkin, I.V. Trekhonin

MODERNIZATION OF THE BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Topicality: The relevance of upgrading a contactless electric motor is substantiated.

Findings: A simulation of the operation of a contactless electric motor has been carried out. The main problem of the electric motor operation is determined: the impossibility of providing the required load characteristic using a classical construction.

Research limitations: The options for solving this problem are considered: the use of a gearbox with a variable transmission coefficient and the use of a motor with a variable EMF-coefficient.

Originality/value: A simulation of a gearbox with a variable transmission coefficient (various options for switching on the motor windings) was carried out, following which a choice was made of a technical solution that meets the requirements.

Keywords: valve electric motor, direct current motor, aircraft drive, model operation, ANSYS Maxwell, ANSYS Maxwell Circuit Editor.