

**Магнитоэлектрическая система управления оборотами бесколлекторного
электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов**

А.О. Никитин

**Magnetoelectric control system of speed of brushless direct current motor
for unmanned aerial vehicle**

A.O. Nikitin

Институт электронных и информационных систем,
Новгородский государственный университет, Великий Новгород, Россия

В статье рассматриваются вопросы создания системы управления электродвигателя для беспилотных летательных аппаратов с использованием магнитоэлектрических датчиков положения магнитной оси ротора. Осуществлено обоснование использования бесколлекторных электрических машин для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также проблем, связанных с применением данного типа электродвигателя. Предложенная система управления в отличие от систем на бездатчиковом управлении и на датчиках Холла обладает рядом преимуществ, таких как: высокая чувствительность, высокая термостабильность, стойкость к значительному уровню радиоактивного излучения, что дает возможность использовать их в условиях космоса, а также высокую технологичность, т.е. легкость освоения даже небольшими производственными предприятиями.

Ключевые слова: магнитоэлектрический датчик положения ротора, вентильный двигатель, беспилотные летательные аппараты, системы управления.

In this paper a problem of development the control system of Brushless Direct Current (BLDC) motor for unmanned aerial vehicle using magnetoelectric position sensors of the axis of the rotor is consider. Justification for the use of BLDC motor for unmanned aerial vehicle, as well as the problems associated with the use of this type of electric machine was carried out. The proposed control system in case of the sensorless control systems and the control system on Hall-sensors has several advantages, such as high sensitivity, high thermal stability, resistance to

significant levels of radiation, which gives the possibility of their use in space, as well as high technological effectiveness, that is, the ease of development of small industrial enterprises.

Key words: magnetoelectric detector of the rotor position, brushless direct current motor, unmanned aerial vehicle, control systems.

Введение

Современный пассажирский авиалайнер невозможно представить без устройств, питающихся от электрической энергии. Более того, одним из наиболее перспективных направлений в развитии авиационной техники является электрификация летательных аппаратов различных типов и назначений: самолетов (от магистральных до малоразмерных беспилотных) и вертолетов (от тяжелых до малоразмерных и беспилотных).

Известно, что на современных летательных аппаратах для работы различных систем используются три источника энергии: гидравлическая, пневматическая и электрическая. Наличие коммуникаций в основе своей использующих первые два вида энергии приводит к снижению надежности, увеличению габаритов и массы агрегатов, усложнению и удорожанию обслуживания. Изменение ситуации становится возможным при замене этих систем на электрические.

Таким образом, перед авиационными разработчиками стоят многие задачи, решение которых приведет к построению полностью электрического самолета. Как писал д.т.н, профессор, действительный член Академии электротехнических наук РФ Халютин С.П.: «Тенденции в самолетостроении, связанные с повышением уровня электрификации летательных аппаратов, приводят, во-первых, к увеличению мощности и объема потребляемой электрической энергии на борту самолетов и вертолетов, а во-вторых, к необходимости более рационального использования имеющейся на борту энергии с учетом требований функционального целевого и вспомогательного оборудования, а так же выполнения заданного маршрута и режима полета» [1].

У вышеуказанных задач, в настоящее время, существует два пути решения: построение полностью электрического самолета, в котором все системы, включая силовую установку, питаются исключительно электрической энергией; построение летательного аппарата на основе гибридной технологии, для которой характерно сочетание электродвигателя с двигателем, работающим на топливе. Так же, стоит заметить, что для второго случая характерно наличие электроприводов топливных насосов и системы смазки.



Рис.1. Конструкция вентильного двигателя фирмы “BEI KIMCO”

Магнитоэлектрическая система управления бесколлекторным электродвигателем для беспилотных летательных аппаратов

Для начала, рассмотрим, какие электродвигатели применяются на современных летательных аппаратах.

Наличие щеточного-коллекторного узла у современных коллекторных электрических машин лишило возможности их применения в авиастроении, в связи с рядом факторов.

Во-первых, щетки играют важную роль в работе коллекторных электрических машин, а, чтобы они могли четко выполнять свое назначение, им надо обеспечить определенный механический «комфорт», адекватную токовую нагрузку и надлежащие условия окружающей среды. Наличие вибрации может привести к ухудшению контакта между щеткой и коллектором. Так же существенную роль играет влажность, а именно, неблагоприятными считаются условия, когда влажность падает ниже критической точки, воздух становится очень сухим и в результате возникает сильное трение и искрение, и щетки быстро изнашиваются.

Во-вторых, щеточный блок работает в режиме постоянной коммутации с присутствующим искрением, что является источником сильных электромагнитных помех.

В настоящее время, в авиастроении широкое распространение получили вентильные электрические машины (ВД), которые по-другому называют бесколлекторные электродвигатели. Конструктивно ВД представляет из себя ротор с закрепленными постоянными магнитами и жестко зафиксированный к корпусу статор с обмотками (Рис.1). Проходящий по обмоткам электрический ток создает магнитное поле, которое, в

свою очередь приводит к повороту ротора. Далее коммутируется следующая обмотка или группа обмоток с последующим поворотом ротора.

Использование бесколлекторного электродвигателя на современных летательных аппаратах обусловлено рядом причин. В конструкции данного типа электродвигателя отсутствует коллектор, за счет чего конструкция электродвигателя существенно упрощается. В связи с этим бесколлекторный электродвигатель также обладает меньшими весом и размером, чем аналогичный электродвигатель с коллектором. У бесколлекторного электродвигателя выше коэффициент полезного действия и показатель мощности на килограмм собственного веса, чем у электродвигателя с коллектором. Более того у бесколлекторного электродвигателя шире диапазон скорости вращения винтов, что обеспечивает более широкие возможности для пилотирования БПЛА и соответственно обуславливает расширение характеристик БПЛА. Немаловажно для БПЛА то, что фактически бесколлекторные электродвигатели греются меньше, чем электродвигатели с коллекторами. Бесколлекторные электродвигатели практически не создают радиопомех и соответственно практически не влияют на функционирование бортового оборудования.

Преимуществом также является то, что он может быть намного меньших размеров, чем электродвигатель с коллектором, потому что возможно применение мощных и небольших неодимовых магнитов на роторе.

Однако, кажущаяся на первый взгляд простота конструкции и принципа действия бесколлекторного электродвигателя выливается, в конечном счете, в ряд определенных трудностей, с которыми приходится сталкиваться разработчику, использующему данный тип двигателя. Для пояснения последнего вернемся к процессам, происходящим в нем на этапе его работы. Как следует из работы ВД, проходящий по заданным обмоткам электрический ток создает магнитное поле, имеющее определенное направление. Ротор, в свою очередь, своим вращением стремится совместить магнитную ось закрепленных на себе постоянных магнитов с эквивалентной магнитной осью статора. Далее, для сохранения момента и плавного разгона или же сохранения скорости вращения, необходимо перекоммутировать обмотки статора, и осуществить данную процедуру нужно в определенный момент, зависящий от положения магнитной оси ротора. Иными словами, для полноценного управления ВД необходимо спроектировать позиционную обратную связь. Эта обратная связь аналогична функции, выполняемой коллектором в машине постоянного тока. В решении данной проблемы разработчики пошли по двум различным путям. И в результате рынок представлен ВД двух типов: с встроенным датчиком положения ротора (ДПР) (Shaft Encoder BLDC) и бездатчиковыми ВД (Sensorless BLDS). В свое время использовались датчики положения на основе различных

свойств, но наибольшее распространение получили датчики гальваномагнитного типа на основе эффекта Холла. Принцип работы бездатчиковых ВД основан на оценке значения ЭДС, наводимой в свободной обмотке (в которой не протекает электрический ток). Несомненными преимуществами бездатчиковых ВД перед ВД с ДПР является простота конструкции, а существенным недостатком – невозможность управления двигателем на малых оборотах, так как величина ЭДС напрямую зависит от частоты вращения. Что касается ВД с ДПР на основе датчиков Холла, то разработчик сталкивается с рядом проблем, связанных с конструктивным расположением элементов Холла, с необходимостью подачи питающего напряжения. Плюс к общим конструкторским недостаткам добавляются недостатки самих датчиков Холла: ограниченный диапазон рабочих температур, наличие остаточных напряжений, низкая стойкость к статическому электричеству и радиоактивным излучениям.

Таким образом, использование в авиастроении ВД с ДПР на основе датчиков Холла затруднено, в связи указанными недостатками, а бездатчиковые ВД не имеют полного диапазона управления скоростью. Поэтому нахождение простого и надежного способа управления бесколлекторной электрической машиной имеет большую актуальность.

В работе [3] был предложен способ управления ВД при помощи магнитоэлектрических датчиков положения магнитной оси ротора (Рис.2).

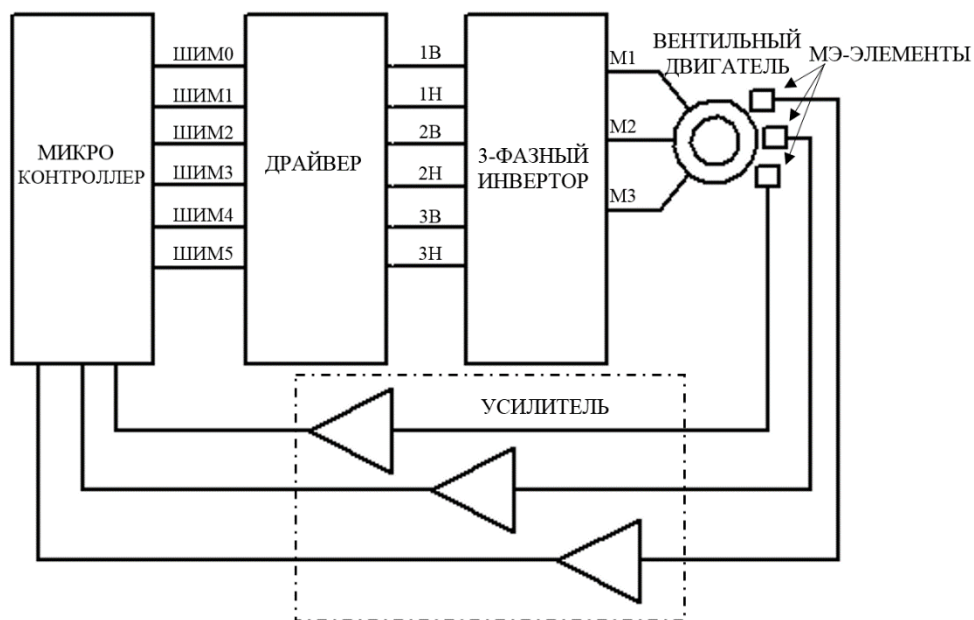


Рис.2. Структурная схема ВД с магнитоэлектрическими датчиками определения положения магнитной оси ротора

Суть метода заключается в следующем: в исходном состоянии микроконтроллер считывает информацию с датчиков о положении ротора, анализирует ее и с учетом

выбранного алгоритма работы вентильного двигателя коммутируется требуемая последовательность фаз.

Результаты эксперимента

На технической базе ОАО «ОКБ-Планета» группой специалистов был разработан макетный образец системы управления (СУ) бесколлекторными электрическими машинами, позволяющий в полной мере оценить достоинства и недостатки различных способов управления (рисунки 3 и 4).

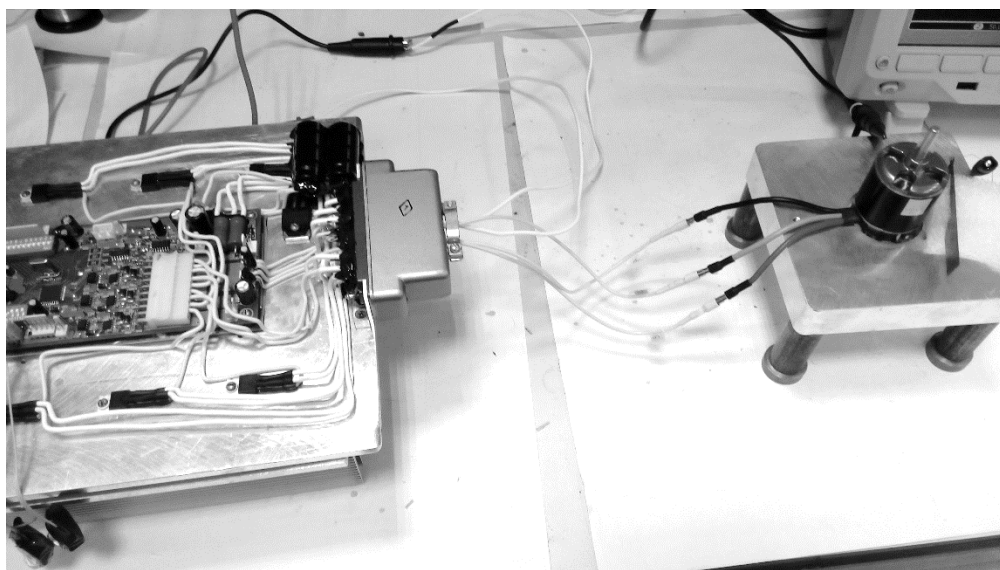


Рис.3 Макетный образец СУ бесколлекторным двигателем.

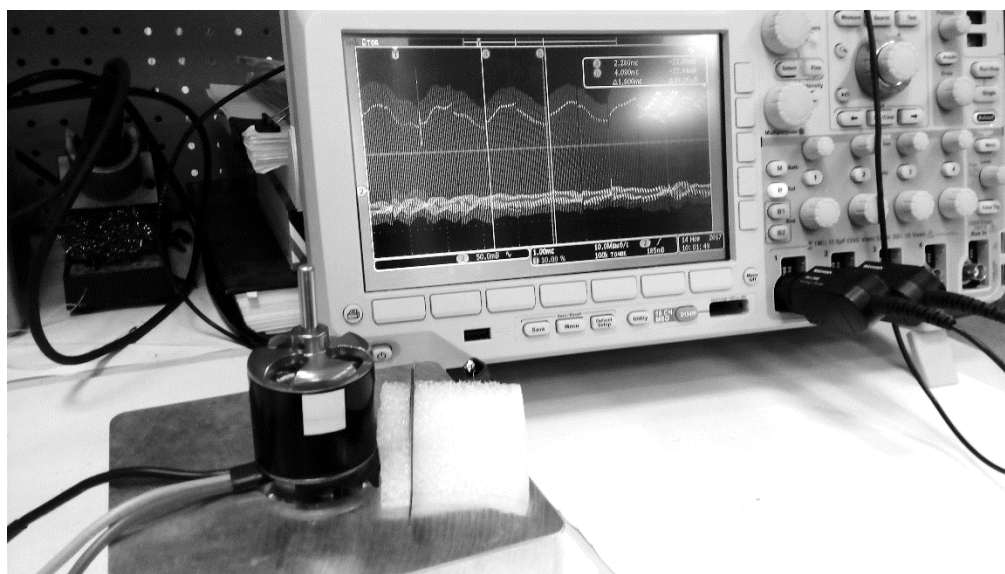


Рис.4 Измерительный стенд.

Измерительный стенд включал в себя бесколлекторный электромотор RC12297 (7 пар полюсов ротора), осциллограф Tektronix MSO 3034. Магнитоэлектрический (МЭ) элемент, конструкция которого подробно обсуждалась в [4], представлял из себя слоистую структуру, состоящую из пьезоэлектрика ЦТС-19 с размером $71 \times 12,5 \times 0,5$ мм и двух обкладок метгласа соответствующего размера, с толщиной 0,02 мм. Расстояние от МЭ-элемента до электродвигателя составляло порядка 10 мм.

Следует заметить, что так как МЭ-элемент в данной ситуации используется в качестве датчика магнитного поля, то для его оптимальной работы необходимо задавать рабочую точку переменным магнитным полем [4]. Для решения этой задачи еще раз обратимся к процессам, проходящим при вращении ВД. Вращение ротора - есть следствие совмещения магнитной оси жестко на нем закрепленных постоянных магнитов с эквивалентной магнитной осью статора, которая образуется в следствии протекания переменного тока определенной частоты. То есть необходимое переменное поле для задания рабочей точки МЭ-элемента задается переменным током обмоток статора. Частоту этого тока задает ШИМ-сигнал, частотой 25 кГц, поступающий на силовые ключи.

Измерения проводились следующим образом: двигатель раскручивался и выходил на обороты около $1600 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$, далее происходила синхронизация переключения обмоток статора относительно вращения вектора магнитного поля ротора и, после, снималась осциллограмма на выходе МЭ-элемента. Результаты измерения предоставлены на рисунке 5.

Как было указано выше частота вращения двигателя была в районе $1600 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$. Отсюда есть возможность рассчитать временной отрезок коммутации одной пары фаз, основываясь на понимании, что за один электрический цикл происходит 6 таких коммутаций: AC – BC – BA – CA – CB – AB [5]:

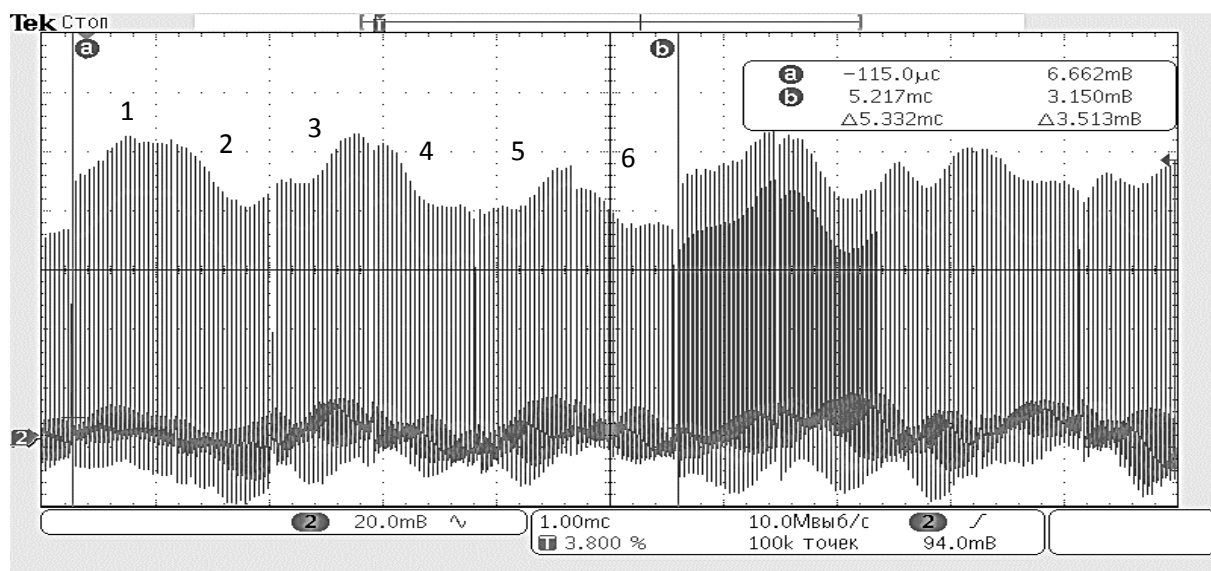
$$t_1 = \frac{60}{N * 6 * p} [c], \text{ где} \quad (1)$$

N – частота вращения [$\text{об} \cdot \text{мин}^{-1}$];

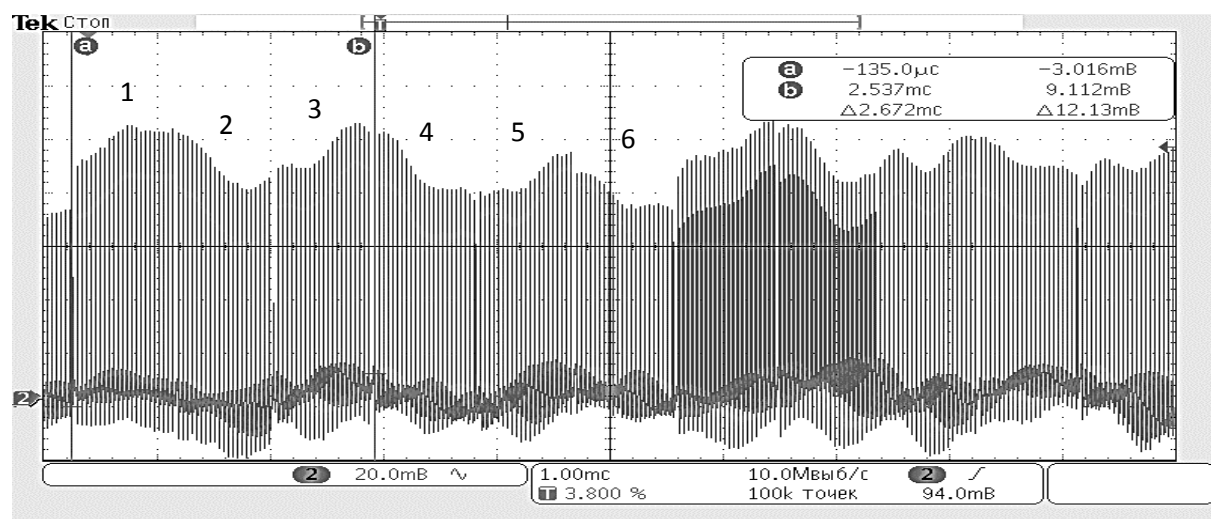
p – количество пар полюсов.

Для нашего случая:

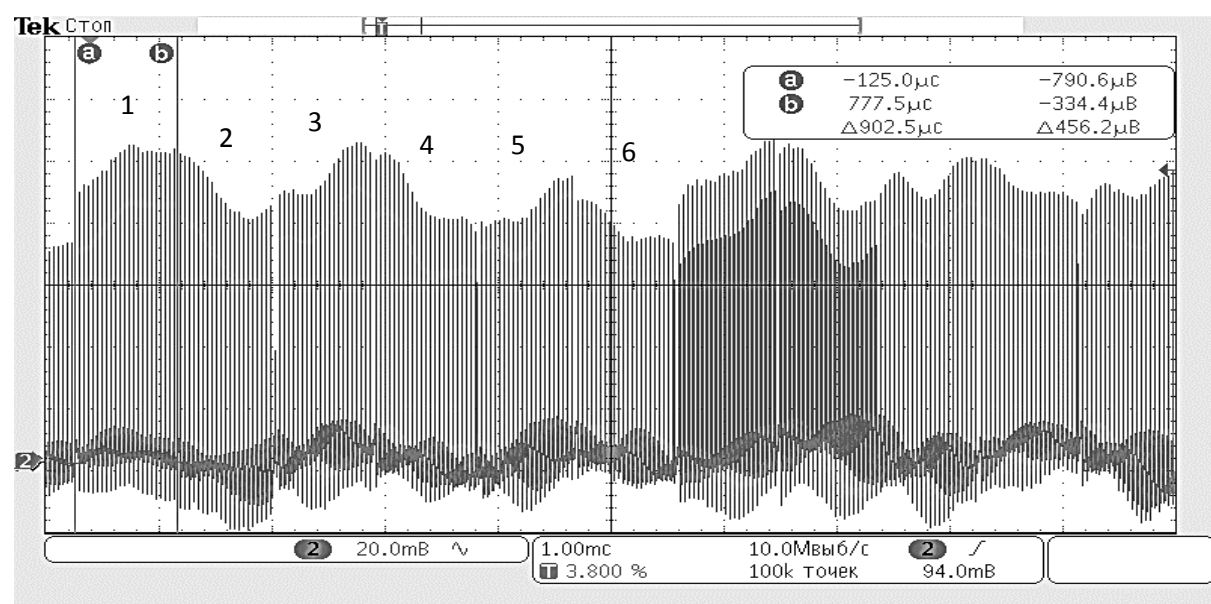
$$t_1 = \frac{60}{1600 * 6 * 7} \approx 893 [\mu c].$$



a)



б)



в)

Рис. 5 Осциллограмма на выходе МЭ-элемента.

На рисунке 5в) временной отрезок отмеченный вертикальными маркерами *a* и *b* совпадает с расчетным. Т.е. на осциллограмме, полученной с выхода МЭ-элемента хорошо прослеживаются все 6 коммутационных этапов – один электрический цикл.

Далее, нам известно количество пар полюсов ротора, можем рассчитать временной интервал, соответствующий одной паре полюсов, для частоты вращения 1600 об*мин⁻¹.

$$t_p = \frac{60}{N * p} = \frac{60}{1600 * 7} \approx 5,357 [мс]. \quad (2)$$

Расчетный результат очень хорошо совпадает с наблюдаемым (рис.5а), который составлял 5,332 мс. Так же на этом рисунке очень хорошо наблюдается влияние магнитного полюса – пьедестал перед первым коммутационным этапом совпадает с пьедесталом после шестого этапа. Между 3 и 4 этапами происходит изменение полюса, что тоже хорошо наблюдается. Всего на один электрический цикл статора, при синхронном вращении ротора, приходится смена одной пары полюсов (один положительный, один отрицательный), а на один физический оборот ротора – смена 7 пар полюсов или 42 коммутационных этапов.

Таким образом, основываясь на данных полученных в результате эксперимента, а именно на оцененной возможности МЭ-элемента фиксировать влияние полюсов, можно прийти к выводу о необходимости использования МЭ-датчиков магнитного поля для построения СУ бесколлекторного двигателя, что обеспечит преимущества перед бездатчиковым СУ в простоте управления, а перед СУ на основе датчиков Холла в связи с недостатками элементов Холла: нелинейность в сильных магнитных полях, ограниченный диапазон рабочих температур, низкая стойкость к радиоактивному излучению.

Заключение

Современный БПЛА представляет собой сложную систему, состоящую из взаимодействующих не менее сложных подсистем. В свете тенденций перехода к построения электрического летательного аппарата, современный БПЛА – это система, включающая электросиловую установку, электроприводы органов механизации, а в случае гибридного БПЛА также электрические приводы топливных насосов и системы смазки. В основе каждой из этих подсистем используются бесколлекторные электрические машины, преимущества которых описаны выше.

Построение системы управления ВД на основе магнитоэлектрических датчиков положения магнитной оси ротора дает ряд преимуществ, которые свойственны МЭ-элементам: высокая термостабильность, стойкость к значительному уровню

радиоактивного излучения, высокая чувствительность, а также высокую технологичность, т.е. легкость освоения даже небольшими производственными предприятиями. Проведенные эксперименты убедительно доказывают возможность построения системы управления бесколлекторного электродвигателя на основе МЭ-датчиков магнитного поля. Полученные осциллограммы напряжений на выходе МЭ-элемента при соответствующих обработке и анализе позволяют в полной мере отслеживать положение ротора, а, следовательно, обеспечить стойкое управление.

Литература

1. Халютин С.П. Электрический самолет: прошлое, настоящее, будущее // Авиапанорама: Наука-Технологии. 2016. №6(120). С.42-51.
2. Уразбахтин Р.Р. Двигатели для беспилотных летательных аппаратов // Межд. науч.-исслед. журнал. 2017. №02(56). ч.3 С.142-144.
3. Никитин А.О., Колесников Н.А., Петров Р.В. Магнитоэлектрический датчик положения оси ротора вентильного двигателя // Вестн. Новг. гос. ун-та. Сер.: Технические науки. 2016. № 7 (98). С.81–84.
4. Бичурин М.И., Петров Р.В., Соловьев И.Н., Соловьев А.Н. Исследование магнитоэлектрических сенсоров на основе пьезокерамики ЦТС и метгласа [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2012. №1. URL: www.science-education.ru/101-5367.
5. Hanselman D. Brushless permanent magnet motor design // Magna Physics Publishing. Motorsoft Division of Fisher Electric Technology. – 2nd ed. 2003. p.392.

Сведения об авторах:

Никитин Александр Олегович

аспирант кафедры Проектирование и технология радиоаппаратуры,

Институт электронных и информационных систем, Новгородский государственный университет, Великий Новгород, Россия.

т. 8 911 0417789

NikitinAO@okbplaneta.ru

Адрес: Новгородская обл., Новгородский р-н, д. Трубичино, д.35, корп.2, кв.7.

Статья публикуется впервые

подпись

дата

Никитин Александр Олегович