

ЛИТЕРАТУРА

1. О геодезической и картографической деятельности [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь, 13 декабря 2021 г. №132- З; принят Палатой представителей 09 ноября 2021 г.: одобр. Советом Респ. 29 ноября 2021 г // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2024.
2. Об утверждении Положения о Единой системе навигационно-временного обеспечения Республики Беларусь [Электронный ресурс]: Постановление Совета Мин. Респ. Беларусь 15 мая 2012 г. № 440// ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2024
3. Ямбаев Х.К. Геодезическое инструментоведение: Учебник для вузов / Х.К. Ямбаев – Москва: Академический Проект, 2020. – 583 с.
4. Карауш Е.А., Печерица Д.С. Государственный первичный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022: исследование метрологических характеристик / Е.А. Карауш, Д.С. Печерица – Измерительная техника, 2022-№11. – 3-8 с.

УДК 621.3.04

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПЕЧАТНЫМ СТАТОРОМ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**А.П. БУЙВИД, А.А. РАДКЕВИЧ, С.А. ПАВЛЮКОВЕЦ,
А.А. ВЕЛЬЧЕНКО**

**Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь**

В настоящее время благодаря новейшим разработкам компонентов для электрических приводов, аккумуляторов, электрооборудования и систем управления, росту мощности электродвигателей, возможность применения электрического привода в летательных аппаратах становится все более реальной. Энергетическая эффективность и удельная мощность играют ключевую роль в определении того, является ли электрический привод подходящим вариантом для применения в авиации.

Вентильный двигатель с печатным статором без сердечника и без зубцов статора обладает такими преимуществами, как высокая плотность мощности и крутящего момента, отсутствие крутящего момента

сцепления, низкий уровень пульсаций, нулевые или минимальные потери в сердечнике, это все помогает повысить общую эффективность электропривода [1]. Поэтому, можно рассмотреть вентильный двигатель с печатным статором на постоянных магнитах без сердечника с осевым магнитным потоком и оценить возможность его применения для электрической тяги в беспилотных летательных аппаратах, а также рассмотреть особенности по проектированию и оценке производительности такого электрического привода.

Электрификация силовых установок летательных аппаратов традиционно предполагает создание тяги, создаваемой электродвигателем, приводящим в движение лопасти беспилотного летательного аппарата. Для достижения этой цели необходим электропривод с высокой мощностью и надежностью, малым весом и высокой энергоэффективностью. Наряду с этими условиями также важен низкий уровень шума, вибраций и жёсткость системы, которые определяют идеальные характеристики электродвигателя.

Современные вентильные двигатели, в частности, с печатным статором при практическом применении показывают значения удельной мощности более 2,3 кВт/кг, что является подходящим для существующих беспилотных летательных аппаратов, требующих для взлёта 95% эффективности при активной массе менее 8 кг [2]. При этом стоит цель увеличения удельной мощности более 12 кВт/кг, поэтому требуется значительное увеличение удельной мощности.

Для достижения высокой плотности крутящего момента и КПД в 95% при пиковой мощности подходит вентильный двигатель с печатным статором на постоянных магнитах с осевым магнитным потоком. Конструкция безынерционного и сегментированного ротора характеризуется высокой производительностью при высокой плотности тока [3], которая требуется для взлета.

Электродвигатели с печатным статором с осевым магнитным потоком привлекают внимание в качестве подходящих вариантов для движителей беспилотных летательных аппаратов из-за высокой удельной мощности и энергоэффективности, достигаемых за счет особенной конструкции статора и исключаящие использование сердечника в катушках статора, что способствует значительному уменьшению потерь на перемагничивание и, в свою очередь, обеспечивает снижения массы самого движителя.

В табл.1 представлен сравнительный обзор конструкций статора вентильных двигателей и связанных с ним показателей производительности [4].

Табл. 1. Конструктивные особенности статора вентиляльных электродвигателей [4]

№ п\п	Тип статора	Номинальная скорость, км/мин	Мощность, Вт
1	Без пазов с радиальным магнитным потоком	15	1000
2	Без сердечника с радиальным магнитным потоком	6	37
3	С разной толщиной дорожек печатной платы	25	16
4	Со спиральной обмоткой статора	1,8	11,2
5	С шестиугольной обмоткой статора	0,375	0,4
6	С концентрической обмоткой статора	7,5	0,28
7	С волновой обмоткой статора	3	0,18

Приведенные в табл. 1 конструкции статора электродвигателей работают с использованием многожильного провода, литцевого провода и спиральных, шестигранных и волновых топологий обмоток статора с определенным диапазоном мощности от 0,3 до 2,3 кВт/кг. В приведенной выше таблице 1, конструкция статора с осевым магнитным потоком без сердечника более привлекательна благодаря своей модульной конструкции и высокой целостности [4].

Вентильные двигатели без сердечника и без пазов с печатным статором могут быть спроектированы таким образом, чтобы иметь широкий диапазон номинальной мощности, варьирующийся в несколько МВт. Однако двигатели без сердечника обычно имеют значительно меньшую индуктивность, чем двигатели с сердечником, что приводит к более низким максимальным скоростям. В то же время двигатели с меньшей индуктивностью требуют более низких напряжений на клеммах для работы с заданной угловой скоростью. При этом с целью обеспечения постоянной мощности для требуемого дополнительного диапазона скоростей возможна реализация таких методов, как относительное вращение диска статора в качестве способа уменьшения потокосцепления или использование управляемого каскада повышения постоянного тока на входе электропривода и ослабление тока [4].

Анализ существующих разновидностей конструкций вентиляльных электроприводов с печатным статором показывает реальную перспективу их применения для приведения в движение лопастей беспилотных летательных аппаратов. С учётом требований, предъявляемым к массогабаритным и энергетическим показателям электрооборудования беспилотных летательных аппаратов, двигатели с печатным статором с осевым магнитным потоком без сердечника с различными типами обмоток статора отличаются высокой удельной мощностью и высокой плотностью крутящего момента, а также имеют КПД, достигающий отметки 95 %, что позволяет их использовать в летательных аппаратах небольшой грузоподъёмности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Taran, N. Waved: A coreless axial flux PM motor for drive systems with constant power operation. / N. Taran, V. Rallabandi, D. M. Ionel. // 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – 2019. – P. 1–6.
2. Talebi, D. Electromagnetic Design Characterization of a Dual Rotor Axial Flux Motor for Electric Aircraft. / D. Talebi, M. C. Gardner, S. V. Sankarraman, A. Daniar, H. A. Toliyat. // 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Hartford, CT, USA. – 2021. – P. 1–8. DOI:10.1109/IEMDC47953.2021.9449611.
3. Taran, N. Evaluating the effects of electric and magnetic loading on the performance of single- and double-Rotor axial-flux PM machines. / N. Taran, G. Heins, V. Rallabandi, D. Patterson, D. M. Ionel. // IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 56, no. 4. – Jul.-Aug. 2020. – P. 3488-3497.
4. Lawhorn, D. On the design of coreless permanent magnet machines for electric aircraft propulsion. / D. Lawhorn, P. Han, D. Lewis, Y. Chulaee, D. M. Ionel. // 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). – IEEE, 2021. – P. 278–283.

УДК 621.785

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.С. ВАСИЛЮК, Е.С. КРИВЧЕНЯ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

В эпоху быстрого технологического развития беспилотные аппараты становятся все более востребованными в различных сферах, включая авиацию, морскую навигацию, сельское хозяйство, транспорт и многое другое. Инновационные технологии играют ключевую роль в разработке и производстве таких устройств, открывая новые возможности и решая сложные задачи. В этой статье будут рассмотрены, какие вызовы и перспективы существуют в интеграции инновационных технологий в процесс проектирования и производства беспилотных аппаратов.