

Процесс изготовления ЭТС постоянно улучшается. Для увеличения количества и улучшения качества необходимо следовать некоторым перспективам:

- расширение диапазона температур: развитие специальных видов электротехнической стали, способных работать при экстремальных температурах, позволит использовать этот материал в более широком спектре условий эксплуатации;
- уменьшение воздействия на окружающую среду: исследования направлены на создание более экологически чистых процессов производства электротехнической стали и использование более устойчивых к окружающей среде материалов;
- интеграция с новыми технологиями: с развитием электроники и электрических технологий, электротехническая сталь будет интегрироваться в новые устройства и системы, такие как электромобили, солнечные батареи, ветрогенераторы и другие.

#### Литература

1. Материаловедение : учебник / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под. общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 5-е изд. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СИЛОВЫХ УЗЛОВ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

А. П. Буйвид, М. А. Мойсееня, А. А. Радкевич

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель С. А. Павлюковец

*Проанализированы конструкции вентильных синхронных электродвигателей с печатным статором. Рассмотрены две структуры компоновки синхронных двигателей с аксиальным магнитным потоком с воздушным сердечником и их влияние на динамические показатели электродвигателя.*

**Ключевые слова:** вентильный электродвигатель, синхронный электродвигатель, печатный статор, аксиальный магнитный поток, воздушный сердечник.

Одной из разновидностей синхронных электродвигателей являются двигатели с использованием фазного ротора или ротора с постоянными магнитами [1]. При этом синхронным двигателям с постоянными магнитами на роторе (СДПМ), как правило, отдается предпочтение по сравнению с синхронными двигателями с фазным ротором (СДФР), особенно для условий, требующих невысокой скорости. Синхронные двигатели с постоянными магнитами на роторе более эффективны, чем другие двигатели, поскольку магнитное поле ротора создается постоянными магнитами, установленными на его поверхности, а не при помощи щеточного или бесщеточного возбуждения поля. Это повышает их надежность и снижает затраты на их обслуживание [2].

Синхронные двигатели с постоянными магнитами обычно подразделяются на три категории в зависимости от направления магнитного потока: радиальные, аксиальные (осевые) и поперечные. Помимо общих преимуществ, связанных с применением ротора с постоянными магнитами, СДПМ с постоянным осевым магнитным потоком (AFPM) имеют достоинства по сравнению со своими аналогами, включая высокое соотношение крутящего момента к массе, более высокую удельную мощность, более высокий КПД и более компактную структуру. Исходя из этого, двигатели

ли типа AFPM нашли применение в современных электроприводах колесных, робототехнических и гибридных механизмов [3].

Синхронные двигатели с печатным статором с осевым магнитным потоком имеют различные конструктивные вариации обмоток статора, включающие в себя многожильный провод, литцевый провод, а также топологии печатных плат, содержащие спиральные, шестигранные и волновые катушки с определенным диапазоном мощности от 0,3 до 2,3 кВт/кг [3].

Среди указанных вариантов структура синхронных двигателей с осевым потоком без сердечника более привлекательна благодаря своей модульной конструкции и целостности. 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, которые могут быть достигнуты при помощи обычных методов [2], [3].

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 средства уменьшения потокосцепления или использование управляемого каскада повышения постоянного тока на входе электропривода и использование метода ослабления тока. Непосредственное влияние воздушного зазора в двигателях с аксиальным магнитным потоком без сердечника подвергает обмотки статора значительным потерям переменного тока в проводниках, особенно при работе на высоких скоростях. Использование печатных плат в качестве статора позволяет легко вносить изменения в конструкцию обмоток, а также открывает доступ к модульной конструкции, в которой последовательная (рис. 1, а) или параллельная (рис. 1, б) компоновка из нескольких печатных плат может служить для увеличения крутящего момента или скорости электродвигателя.

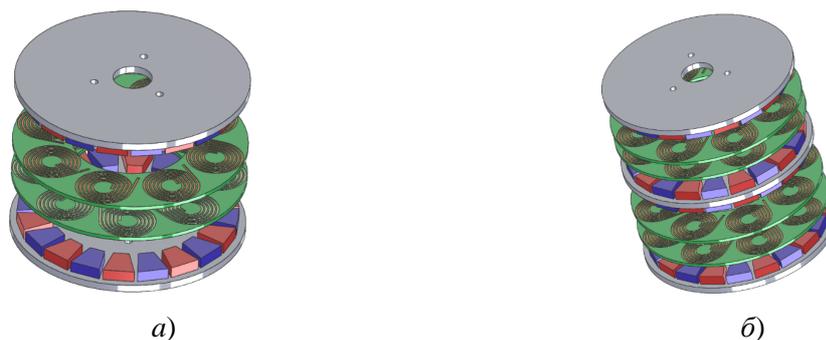


Рис. 1. Модульная конструкция:

а – последовательная компоновка вентильного двигателя с печатным статором с осевым магнитным потоком; б – параллельная компоновка вентильного двигателя с печатным статором с осевым магнитным потоком

Главный компромисс заключается в соотношении плотности тока, активной массы и энергоэффективности [4]. Конструкции AFPM с минимальной активной массой, как правило, имеют более высокие плотности тока, в то время как структуры двигателей с печатным статором с высокой энергоэффективностью, как правило, имеют более низкие плотности тока. Хотя большее число пар полюсов увеличивает

частоту вращения электропривода, это может снизить активную массу и потери в меди двигателя. Помимо этого, увеличение числа пар полюсов увеличивает сложность конструкции двигателя и системы охлаждения и влечет потери в сердечнике; таким образом, конструкции с большим количеством полюсов достигли эффективности, сравнимой с конструкциями с меньшим количеством полюсов. Однако, для таких электроустановок, как электроприводы винтов летательных аппаратов, в условиях полета конструкции с большим числом полюсов имели более низкую эффективность, поскольку потери в сердечнике составляли больший процент электромагнитных потерь, чем при взлете.

Магниты ротора располагают в виде матрицы Хальбаха для обеспечения более синусоидального распределения потока, что может снизить потери в сердечнике и крутящий момент при зацеплении [1]. Кроме того, матрица Хальбаха обеспечивает обратное распространение магнитного потока [4], позволяя заменить сердечник ротора на легкий полимер, армированный углеродным волокном.

Основываясь на моделировании, для плотности тока, создаваемой печатной платой, подходящей для высокопроизводительного охлаждения, мощность, типичная для силовых двигателей многовинтовых малых самолетов, т.е. 10 кВт при 2600 об/мин, может быть достигнута с использованием нескольких печатных плат с параллельными слоями или аксиально-модульной альтернативной компоновки с 3 роторами и 2 статорами [5].

#### Литература

1. Gieras J. F. Axial flux permanent magnet brushless machines / J. F. Gieras, R. J. Wang, M. J. Kamper. – Springer Science & Business Media, 2008.
2. Tiegna H. Over view of analytical models of permanent magnet electrical machines for analysis and design purposes / H. Tiegna, Y. Amara, G. Barakat // Mathematics and Computers in Simulation. – 2013. – Т. 90. – С. 162–177.
3. On the design of coreless permanent magnet machines for electric air craft propulsion / D. Lawhorn [et al.] // 2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). – IEEE, 2021. – С. 278–283.
4. Zhu, Z. Q., Howe D. Halbach permanent magnet machines and applications: IZ.Q 2hu // IEE Proceedings-Electric Power Applications. – 2001. – Vol. N 4. – С. 299–308.
5. Johnson M. Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays / M. Johnson, M. C. Gardner, H. A. Toliyat // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – IEEE, 2015. – С. 108–114.

## **АБСОРБЦИОННЫЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС С ГАЗОВЫМ ПРИВОДОМ В СИСТЕМЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПОДОГРЕВА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

**В. В. Янчук**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель В. Н. Романюк

*Приведены основные результаты расчета изменения эффективности работы электрической станции на базе паротурбинной установки ПТ-60. При модернизации системы регенеративного подогрева питательной воды за счет включения в схему абсорбционного теплового насоса (АБТН) с приводом на дымовых газах, отбираемых из тракта парового котла. Данное решение позволяет вытеснить часть пара из отборов турбины, следовательно, увеличить выработку электроэнергии. Предложенная модернизация актуальна для станций, где имеется значительный невозврат конденсата, так как температура нагреваемого потока на выходе из АБТН ограничивается 85°C. В результате*