

## ДВИГАТЕЛЬ С ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ – КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1. Введение

Впервые машину с поперечным магнитным потоком (Transversal flux machine – TFM) предложил В.М. Морди еще 1895 году. Но, к сожалению, на тот момент отсутствовали возможности автоматизированного проектирования и производства. Однако, в последние десятилетия в связи с развитием моделирования на основе численных методов, а также современных технологий в производстве, TFM стали приобретать все большее значение. В настоящее время несколько научно-исследовательских групп активно занимаются вопросами проектирования и производства этого типа машин. Эти работы показали высокий потенциал TFM с точки зрения энергетических показателей при высоком удельном моменте и хороших массогабаритных показателях. [1,2,3,4,5,6] Кроме этого TFM позволяет реализовать многополюсную конструкцию (20 – 60 полюсов), что открывает путь к созданию тихоходных высокомоментных машин прямого (безредукторного) электропривода. Этот тип машин позволяет применить самые простые, экономичные и надежные на сегодняшний день обмотки статора.

Несмотря на эти преимущества, лишь несколько компаний осваивают производство TFM. Риск внедрения новых производственных технологий и рост производственных затрат останавливает многие компании от внедрения в производство этих машин [7,8].

Представленная работа посвящена моделированию процессов происходящих в наиболее простой конструкции TFM с постоянными магнитами плоской формы на внешнем роторе, что позволяет наиболее явно представить преимущества и недостатки концепции этой машины и тем самым определить новые области ее применения. С этой целью для моделирования были применены конечноэлементные программные комплексы ANSYS EM, COMSOL и COSMOS.

Наиболее важные результаты проверялись экспериментально. При моделировании и экспериментах использовался промышленный образец двигателя швейцарской фирмы SERVAX. На основании проведенных исследований разрабатывается патентоспособный образец TFM с улучшенными динамическими свойствами и массогабаритными показателями, меньшим расходом активных материалов.

### 2. Общее устройство машины и принцип действия

Статор состоит из кольцевой обмотки, на которую равномерно одеты магнитопроводы-полюса. Каждый такой магнитопровод состоит из двух зубцов, которые соединены ярмом. На наружной поверхности ротора расположено такое же количество полюсов как и на статоре и они могут быть сформированы постоянными магнитами (PM TFM) или стальными магнитопроводами (индукторный TFM). В дальнейшем будем рассматривать машину с постоянными магнитами, как это показано на рис.1.

На рисунке 1 показано общее устройство TFM с внутренним ротором.

Если по обмотке статора начинает протекать ток, полюса ротора переместятся в нейтральное положение, то есть постоянные магниты ротора расположатся напротив зубцов магнитопроводов статора и там останутся.

Максимальный момент достигается в том случае, когда зубцы магнитопроводов-полюсов статора оказываются между разнополярными магнитами ротора. При этом, момент не зависит от направления тока в обмотке. Для создания последующего вращения необходима, по меньшей мере, еще одна аналогичная магнитная система (фаза), расположенная в аксиальном направлении по отношению к исходной. При этом полюса статора второй фазы должны быть смещены на некоторый угол по отношению к полюсам первой фазы, а магниты фаз ротора не имеют смещения друг относительно друга и располагаются на общем корпусе, то есть создается такая ситуация, при которой часть полюсов статора всегда находятся между разнополярными магнитами ротора. Таким образом, при наличии токов в обмотках обеих фаз статора, на общий ротор будет постоянно действовать тангенциальная сила, создающая вращающий момент.

Зависимость момента от тока и угла положения ротора является нелинейной функцией и характеризуется значительными пульсациями (до 20% от номинала).

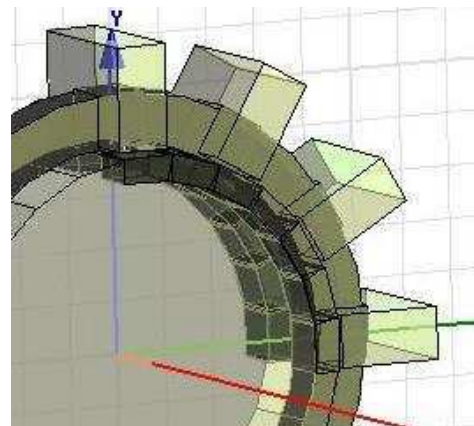
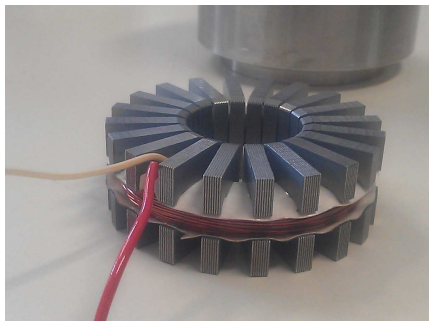


Рис. 1 К пояснению устройства и принципа действия TFM



а)



б)

Рис. 2 Фаза статора а) и двухфазный ротор б) ПМ ТФМ швейцарской фирмы SERVAX с внешним ротором

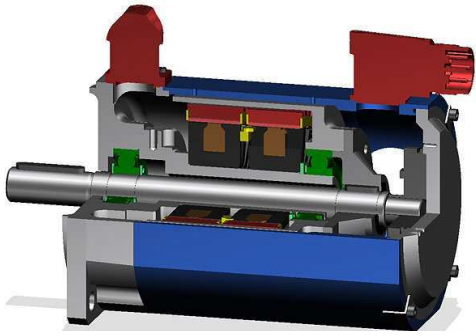


Рис. 3 Конструкция ТФМ MDD1-91-2 (SERVAX)

Для сглаживания этих пульсаций можно прибегнуть к увеличению аксиальнорасположенных фаз, что и делают некоторые фирмы. Но это приводит к увеличению габаритов, усложняет технологию изготовления и соответственно стоимость изделия.

В последние десятилетия активно ведется работа по увеличению удельного вращающего момента ТФМ и как результат создано значительное количество различных конструктивных исполнений этих машин. Среди них ТФМ с концентраторами магнитного потока, двух-, четырех- роторные (double-sided) ТФМ, ТФМ с когтеобразными полюсами.

Высокий удельный вращающий момент в ТФМ достигается благодаря двум основным свойствам:

- в отличие от классических электрических машин с продольным распространением магнитного потока, в ТФМ путь замыкания магнитного потока в магнитопроводе и тока в обмотке условно не зависят друг от друга и могут быть оптимизированы по отдельности;

- обмотка статора не имеет лобовых частей и поэтому ее масса, внешние габариты, поток рассеивания и потери на 25 – 30% меньше чем в классических электрических машинах.

В данной работе предлагается путь уменьшения пульсаций вращающего момента и одновременного его увеличения, который заключается в применении оптимальной формы импульса тока обмотки статора. При этом конструкция машины не меняется, не происходит увеличение стоимости ее изготовления.

### 3. Моделирование картины магнитного поля

Для оценки динамических возможностей двигателя на первом этапе были смоделированы в 3D формате картины распределения магнитного поля в сердечнике статора, в роторе с постоянными магнитами и картина взаимодействия магнитных полей статора и ротора в статике и динамике.

Данные картины магнитного поля позволяют качественно и количественно оценить состояние магнитного

поля в машине и определить значение вращающего момента. Картины поля приведенные на рисунке 4 являются фиксацией одного мгновения динамического изменения поля при движения ротора и изменении тока в обмотке статора по синусоидальному закону при частоте 50 Гц, которые были реализованы в работе. Векторная картина магнитного поля (рисунок 5) показывает максимальное использование магнитопроводов полюсов статора и возможностей постоянных магнитов ротора, наглядно демонстрируют причины возникновения пульсаций вращающего момента.

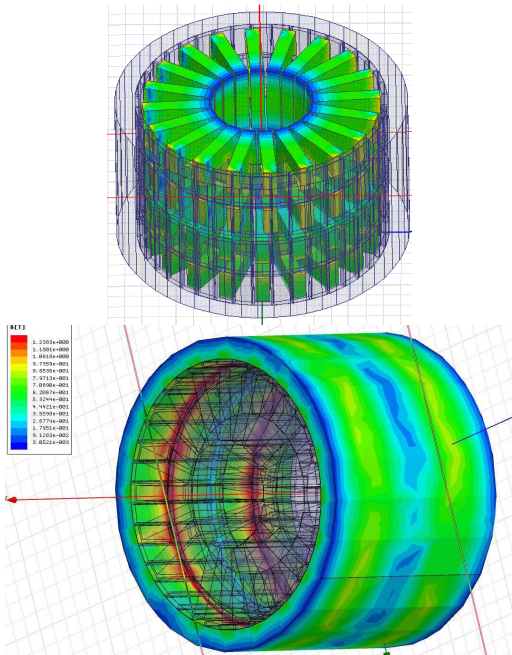


Рис. 4 Распределение магнитной индукции в статоре и роторе при максимальном токе с учетом сдвига фаз

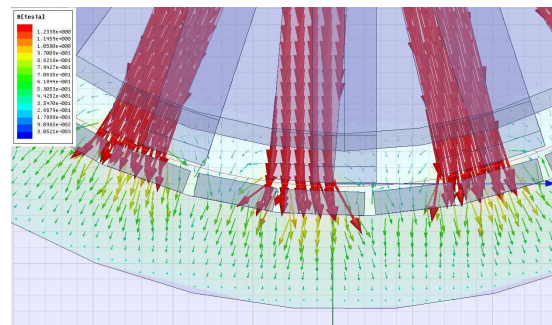


Рис. 5 Векторная картина магнитного поля статор-ротор

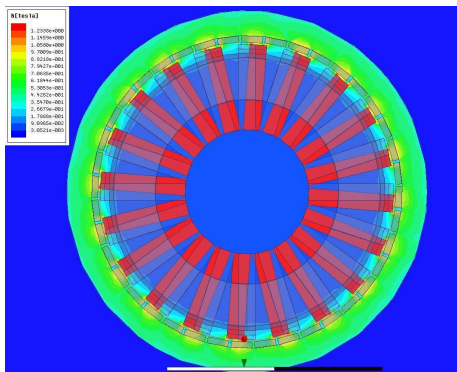


Рис. 6 Распределение магнитного поля в рабочем режиме

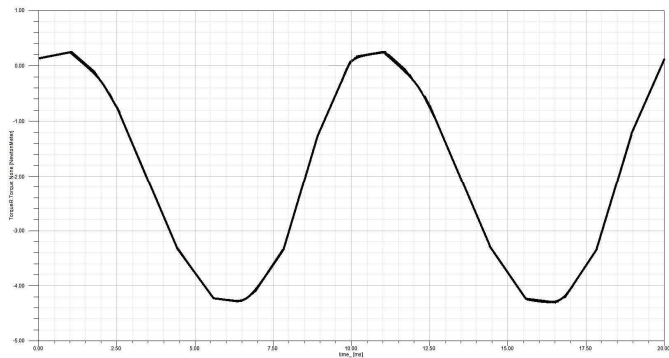


Рис. 7 Кривая момента TFM с учетом вращения ротора

Модель поля (рисунок 6) показывает формирование тангенциальной силы, создающей вращающий момент.

Последующее моделирование динамики вращающего момента и его гармонический анализ позволяют сформировать форму тока в обмотке статора с учетом сдвига фаз двигателя во времени и в пространстве.

Для комплексного определения возможностей исследуемого TFM было осуществлено моделирование теплового состояния машины в номинальном режиме, которое подтвердило оптимальное использование активных материалов машины, температура обмотки не превышает  $130^{\circ}\text{C}$ , что отвечает классу изоляции F (рисунок 8)

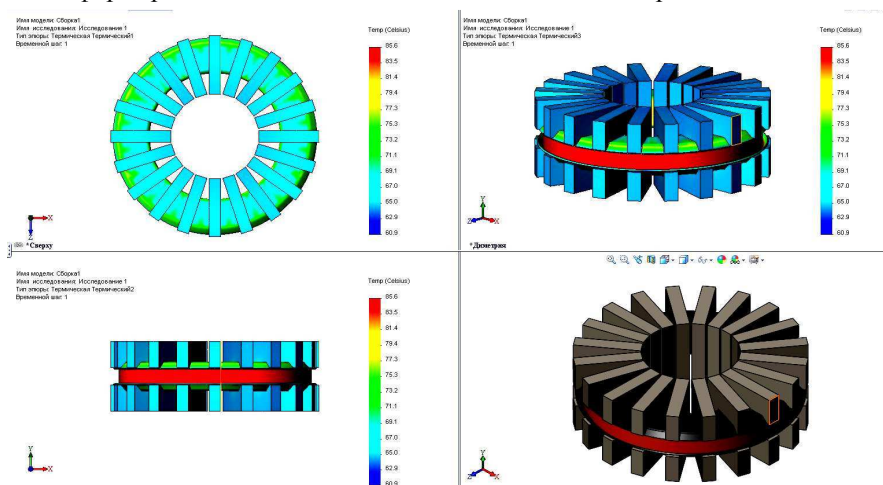


Рис. 8 Модель теплового состояния фазы TFM в номинальном режиме

#### 4. Экспериментальные исследования

Для практических и экспериментальных исследований была изготовлена экспериментальная установка показанная на рисунках 9 и 10. В качестве нагрузки TFM была использована стандартная машина постоянного тока. Момент измерялся тензометрическим нагрузочным устройством. Объектом исследования был промышленный образец TFM фирмы Servax Drives/Landert Motoren GmbH со следующими данными:

Число фаз:	2
Число витков в обмотке фазы:	236
Максимальная частота вращения:	900 rpm
Число пар полюсов:	20
Максимальный момент:	9 Nm

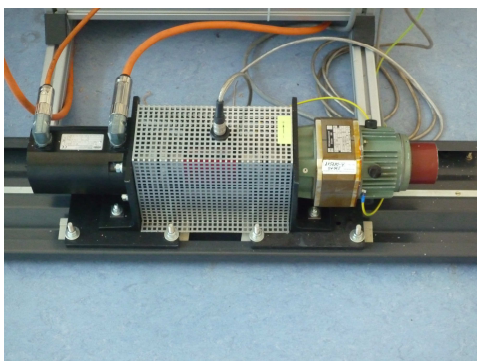


Рис. 9 Частный вид экспериментальной установки

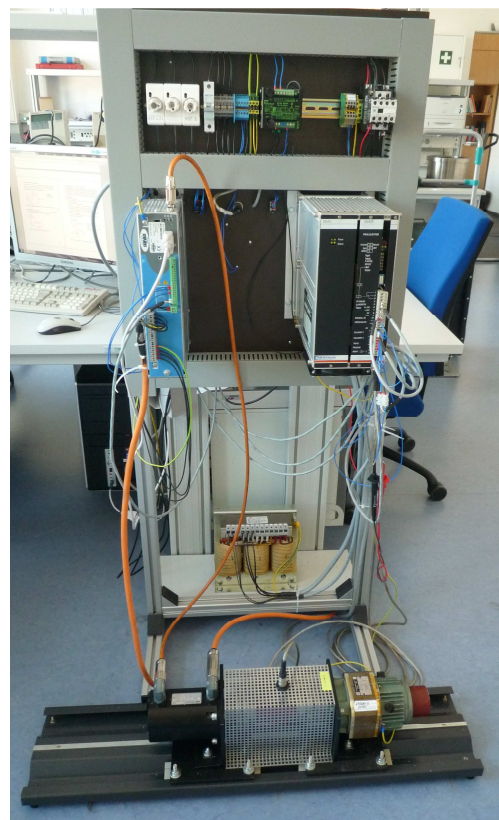


Рис. 10 Общий вид экспериментальной установки

Конструкция испытываемой машины более детально представлена на рисунках 1,2,3,4.

На рисунке 11 представлена зависимость зубцового момента от угла поворота ротора. Здесь основная частота связана с числом полюсов. Компонента с двойной частотой появляется из-за реактивного момента.

На рисунке 12 представлены диаграммы моментов и токов при нагрузке 7 Нм и частоте вращения 50 и 100 об/мин соответственно.

На рисунке 13 построен соответствующий Фурье-анализ. Он подтверждает, что измеренные частоты связаны с числом полюсов и реактивным моментом.

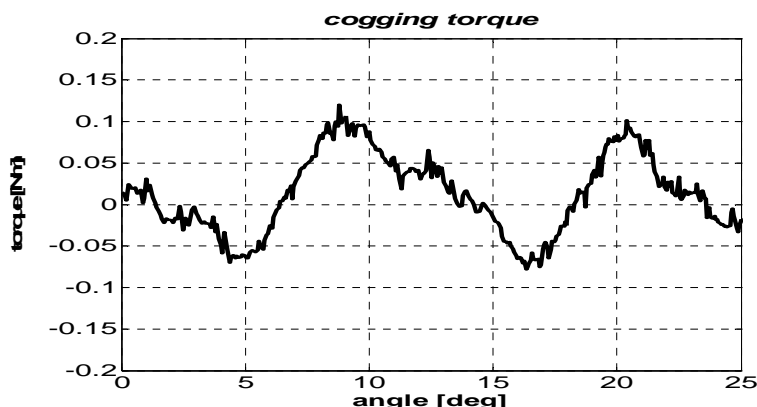


Рис. 11 Зависимость зубцового момента от угла поворота ротора

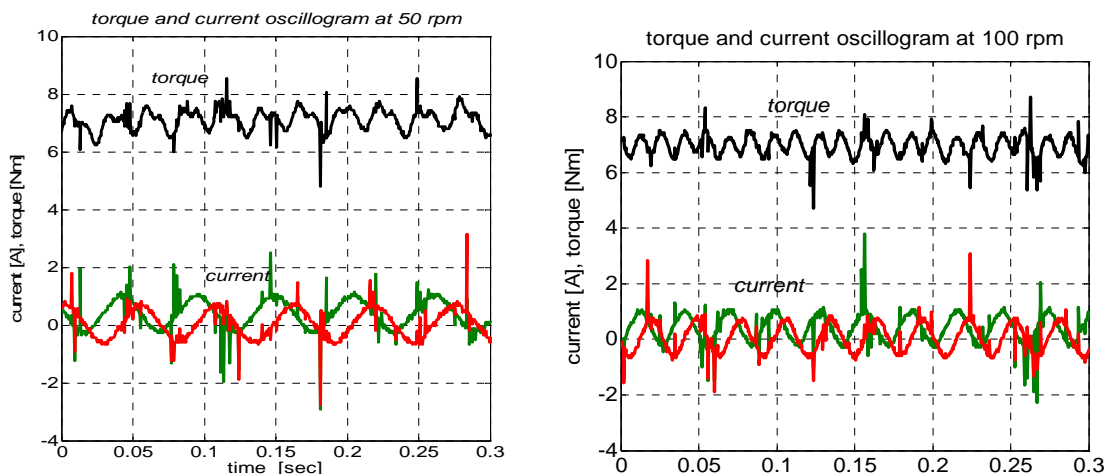


Рисунок 12 Диаграммы моментов и токов при 50 и 100 об/мин

## 5 Результаты и выводы

В результате проведенных комплексных исследований начата разработка варианта TFM с меньшим расходом материалов постоянных магнитов, улучшенными массогабаритными показателями и снижением пульсаций вращающего момента практически в два раза.

Моделирование магнитной системы, электромеханического преобразования энергии, создание вращающего момента TFM позволяет достигать более высоких удельных энергетических и моментных показателей, обеспечивает снижение колебания момента без дополнительных усложнений конструкции и энергозатрат, что в конечном итоге позволяет расширить сферу применения данных машин.

1. [Weh07]Weh, H., Transversalfußmaschine. In: Schröder, D., Elektrische Antriebe – Grundlagen, Springer, 2007
2. Jiang, J., Analytische und dreidimensionale numerische Berechnung von Transversalfußmaschinen, Braunschweig, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau u. Elektrotechnik, Diss., 1988
3. Svehkarenko, D., Cosic, A., Soulard, J., Sadarangai, C., Transverse flux machines for sustainable development – road transportation and power generation, PEDS 2007, 1108-1114, 2007
4. Lange, A., Canders, W.-R., Laube, F., Mosebach, H., Comparison of different drive systems for a 75 kW electrical vehicle drive, ICEM 2000, Finnland, 2000
5. Werner, U., Raffel, H., Harling, O., Orlik, B., Optimierung des Betriebsverhaltens bezüglich der Drehmomentwelligkeit und Normalkraftschwankungen von Transversalfußgeneratoren für Windkraftanlagen, DFMRS2004, Bremen
6. Werner, U., Raffel, H., Orlik, B., Transversalfußgeneratoren mit hoher Leistungsdichte in Multi-Megawatt-Windenergieanlagen, Wissenschaftsforum, Messe HUSUMWIND, September 2005
7. Berchten, Stefan: “Kosten sparen – mit Direktantrieben in Transversalfußtechnik”, Landert-Motoren AG, Schweiz, 1997
8. <http://www.kem.de/home/-/article/30599594/30921550>

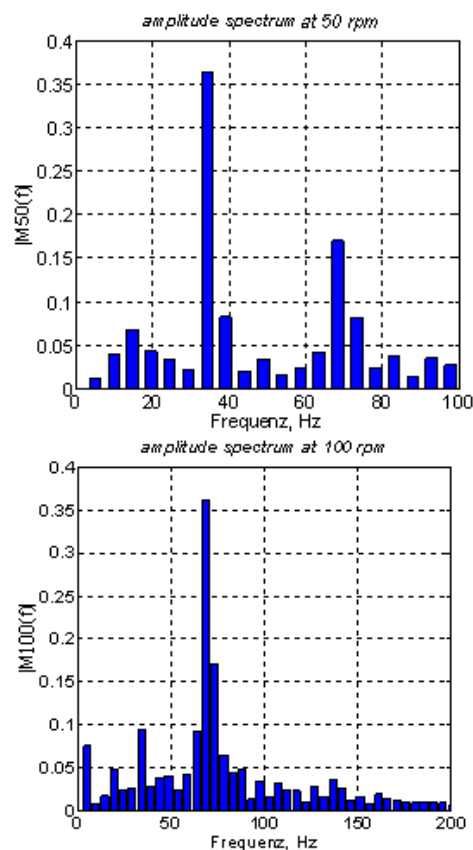


Рисунок 13