

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТОРЦЕВОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЕВОЙ МОДЕЛИ

Тихонов А.И., Шишкин В.П., кандидаты техн. наук, Рубцов Д.В., инж.

Рассмотрена проблема выбора оптимального соотношения числа полюсов на роторе и пазов на статоре торцевого ветрогенератора, отличающегося высокой технологичностью конструкции, что позволяет изготавливать его на не электромашиностроительных предприятиях. Для решения этой проблемы использована разработанная в ИГЭУ система конечно-элементного моделирования магнитного поля, интегрированная в среду MathCad, позволяющая имитировать работу электрической машины в динамике.

В настоящее время возрастающее внимание привлекает к себе идея использования нетрадиционных источников энергии, среди которых наибольший интерес вызывают ветроустановки. Поэтому неслучайно к этой идее обращаются некоторые предприятия военнопромышленного комплекса, которые в рамках конверсии стремятся в полной мере реализовать возможности имеющегося у них оборудования. В связи с этим возникает задача разработки технологичного и простого в эксплуатации ветрогенератора, производство которого может осуществляться в условиях не электромашиностроительного предприятия [1].

Особенность постановки задачи требует в первую очередь исключения из производственного процесса операции штамповки. Это значит, что статор должен навиваться из ленты электротехнической стали. При этом наиболее технологичной оказывается торцевая конструкция генератора с постоянными магнитами.

Иногда в подобных случаях предлагается использовать беспазовую конструкцию статора. Таковую машину сравнительно легко рассчитать, и она проста в производстве. Однако из-за большого немагнитного промежутка между статором и ротором снижается эффективность использования постоянных магнитов. В случае пазовой конструкции с малым воздушным зазором использование постоянных магнитов может быть существенно увеличено. Технология производства усложняется несущественно, так как пазы могут быть сформированы уже после навивки пакета статора путем фрезеровки. Правда, пазы оказываются открытыми, тем не менее такая конструкция более экономична, чем конструкция с гладким статором. Однако возникает ряд проблем, которые могут быть решены только в ходе предварительных научных исследований с использованием полевых моделей.

В изначально предложенной конструкции однофазной машины малой мощности, в которой число пазов на статоре равно числу полюсов, возникает магнитное залипание ротора. Что касается скоса пазов, то в машине торцевой конструкции с фрезерованными пазами реализовать его практически невозможно. Поэтому возникла идея однофазной обмотки, укладываемой в число пазов, неравное числу полюсов, что в электромагнитном отношении эквивалентно укорочению или удлинению шага обмотки. В некоторых катушках при этом наводится

ЭДС обратного направления, что уменьшает результирующую ЭДС обмотки. Тем не менее на это можно пойти.

Таким образом, была поставлена задача: определить оптимальное соотношение числа пазов и полюсов, обеспечивающее максимум ЭДС однофазной обмотки торцевого ветрогенератора.

Решение такой задачи традиционными инженерными способами, основанными на приближенном расчете магнитного поля по средней силовой линии, как и в любом случае расчета нетрадиционной конструкции, сопряжено с вероятностью возникновения существенной погрешности.

Для решения подобных задач, отличающихся необходимостью расчета электрических машин с нетрадиционной конструкцией, для которых не существует проверенной инженерной методики расчета, на кафедре электромеханики ИГЭУ была разработана система полевого моделирования электро-механических устройств (СПМ ЭМУ) [2], а также методика поиска наилучшего технического решения с помощью данной системы.

СПМ ЭМУ представляет собой пакет расширения MathCad, поставляющий в него:

1) функции формирования конечно-элементной модели, с помощью которых в среде MathCad может быть написана программа параметрического генератора, позволяющая по ограниченному списку интегральных параметров автоматически генерировать математическую модель электро-механического устройства для решения задачи расчета двумерного квазистационарного магнитного поля методом конечных элементов в нелинейной постановке при задании источников поля обмотками с током и постоянными магнитами;

2) функции организации численного эксперимента, с помощью которых в среде MathCad может быть написана программа, имитирующая практически любой эксперимент с использованием математической модели электро-механического устройства, возвращающая в данную программу для обработки все величины, характеризующие магнитное поле в данной модели при любом сочетании токов в обмотках;

3) окно интегрированной среды СПМ ЭМУ с управляющими элементами, с помощью которых можно формировать и рассчитывать конечно-элементную модель в интерактивном режиме с использованием средств визуализации, типичных для

аналогичных систем полевого моделирования, таких, как EICut, FEMLab, ANSYS и т.п.

Таким образом, с помощью СПМ ЭМУ можно написать в среде MathCad программу, которая организует какой-то циклический процесс, позволяющий на каждом шаге цикла автоматически генерировать или деформировать конечно-элементную модель ЭМУ и одновременно рассчитывать в ней магнитное поле. Принимая допущение о квазистационарном характере магнитного поля, можно использовать результаты такого полевого моделирования, например потокосцепления обмоток, для реализации алгоритма расчета любого динамического процесса. При этом такой расчет будет учитывать не только фактор нелинейности магнитных характеристик стали и взаимовлияние полей, создаваемых различными обмотками, но и все конструктивные особенности активной области машины, которые не учитываются в традиционных методиках расчета динамических режимов.

Для расчета магнитного поля в торцевом генераторе требуется наличие системы трехмерного моделирования. Однако в настоящее время возможности компьютерной техники практически не позволяют реализовать серию расчетов трехмерного поля, содержащую сотни, а иногда и тысячи обращений к модели. Даже в двухмерном моделировании приходится идти на сознательное загрузле-

ние модели, ограничивая количество узлов, иначе расчет будет длиться сутками. Тем не менее расчет двухмерной модели, даже при наличии ряда допущений, оказывается гораздо более точным, чем расчет по непроверенной инженерной методике.

Единственным существенным допущением при расчете торцевого ветрогенератора с помощью СПМ ЭМУ является допущение о том, что потокосцепление обмотки определяется картиной поля в среднем сечении машины. Другими словами, данная модель представляет собой линейную развертку машины, являющуюся типичной двухмерной моделью.

В среде MathCad была написана подпрограмма генерации конечно-элементной модели линейной развертки машины по списку параметров, однозначно характеризующих геометрию расчетной области. Меняя параметры, например количество зубцов и полюсов, а также их размеры, можно получать и исследовать модели целой серии однотипных устройств. Отдельным параметром задавалось положение ротора относительно статора (угол поворота). Создание такого генератора является типичным примером геометрического программирования.

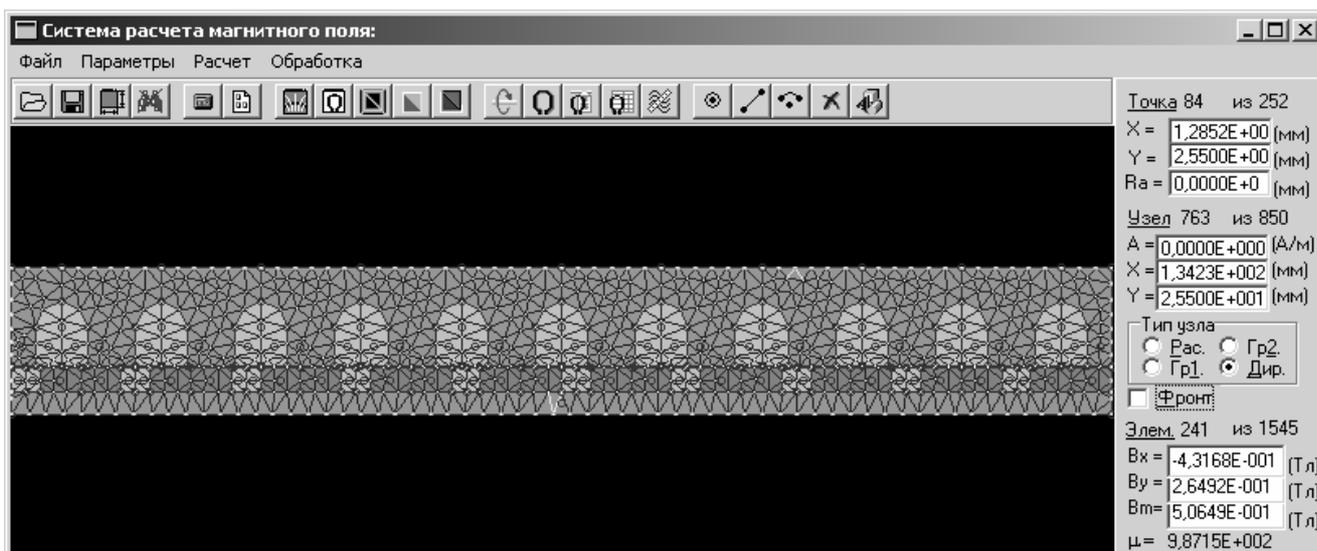


Рис. 1. Окно СПМ ЭМУ с конечно-элементной моделью торцевого ветрогенератора.

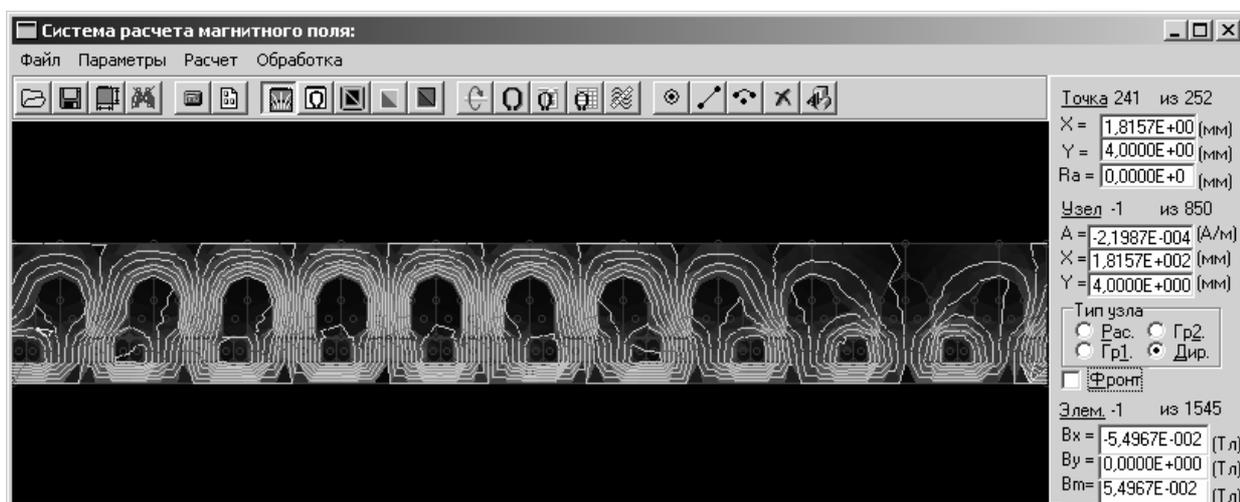


Рис. 2. Картина магнитного поля в модели торцевого ветрогенератора

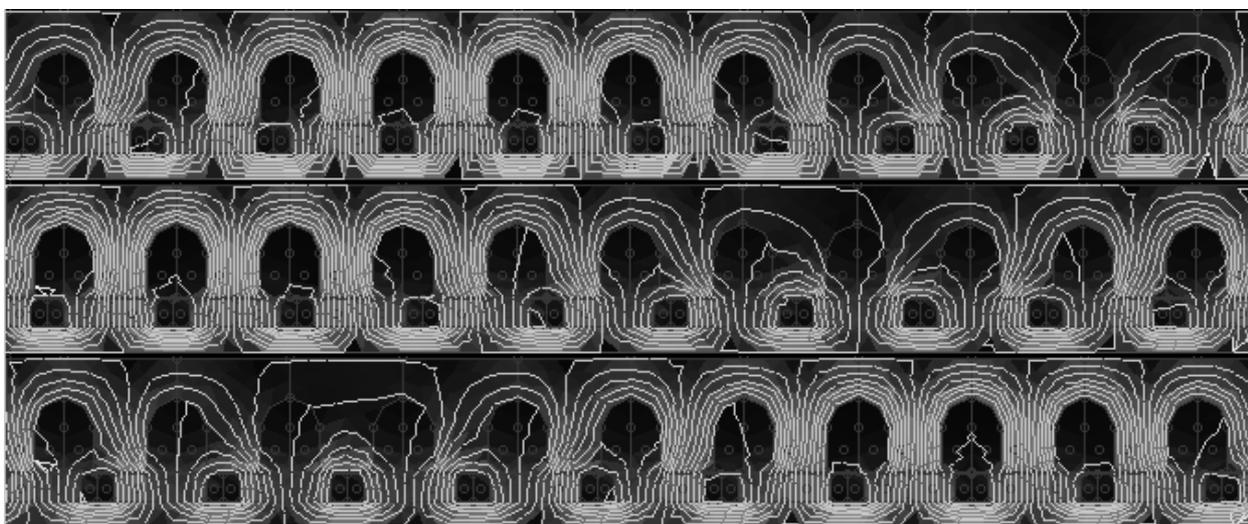


Рис. 3. Изменение модели и картины поля при перемещении ротора.

На рис. 1 показано окно СПМ ЭМУ с моделью торцевого ветрогенератора с числом полюсов $2p = 10$ и числом пазов $Z = 11$. На рис. 2 показана картина поля. Задача решалась с заданием условий периодичности, то есть правые и левые границы области сшиваются.

СПМ ЭМУ позволяет автоматизировать перемещение определенных массивов модели относительно друг друга. Так, достаточно легко организуется, например, вращение ротора, в процессе которого регенерируется только область зазора. В случае линейной модели для реализации перемещения ротора требуется полная регенерация модели на каждом шаге. Поэтому программа численного эксперимента на каждом шаге содержит обращение к подпрограмме генерации модели с последующим ее расчетом. На рис. 3 показано, как меняется модель и картина поля в процессе перемещения ротора.

Процесс генерации модели, содержащей порядка 2000–3000 узлов, длится около секунды. Несколько секунд длится расчет магнитного поля. Таким образом, расчет перемещения ротора в пределах двух полюсных делений может длиться не-

сколько минут, в зависимости от заданного шага перемещений и точности модели. Для решения задачи определения оптимального соотношения количества полюсов на роторе и пазов на статоре была проведена серия экспериментов, каждый из которых состоял в перемещении ротора с постоянной скоростью 3000 об/мин относительно статора. Эксперименты отличались друг от друга соотношением количества полюсов на роторе и пазов на статоре. На каждом шаге определялась величина потокосцепления обмотки статора с полем ротора Ψ . В результате при перемещении ротора формировалась кривая зависимости $\Psi(\alpha)$, где α – угол поворота ротора. Численное дифференцирование этой кривой по времени дает величину ЭДС, наводимую в обмотке статора. В качестве примера на рис. 4, 5 приведены кривые изменения во времени потокосцепления и ЭДС обмотки статора при произвольно заданном числе витков при 10 полюсах на роторе и при 9, 10, 11, 12, 13 и 14 пазах на статоре (в обозначении конкретной кривой указывается сначала число пазов, затем число полюсов, например, E1110 – 11 пазов и 10 полюсов).

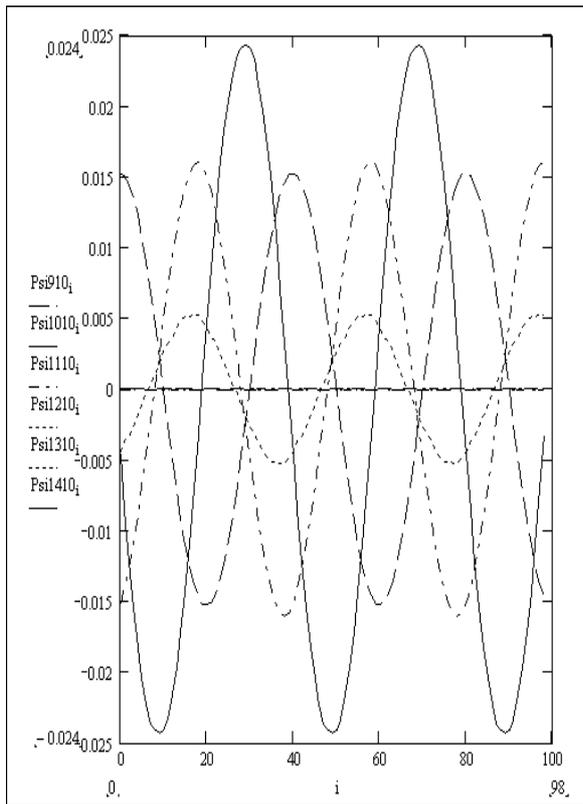


Рис. 4. Изменение потокосцепления обмотки статора при перемещении ротора.

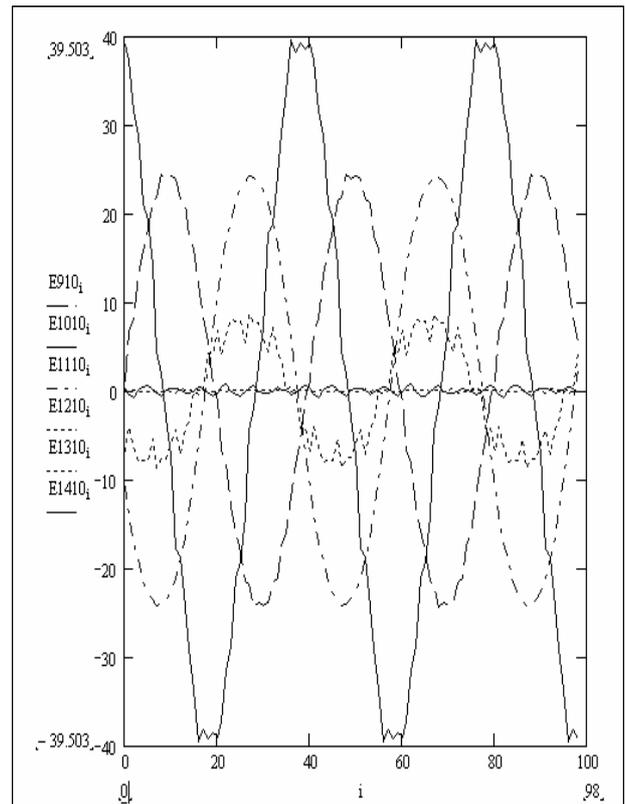


Рис. 5. Изменение ЭДС, наводимой в обмотке статора при перемещении ротора.

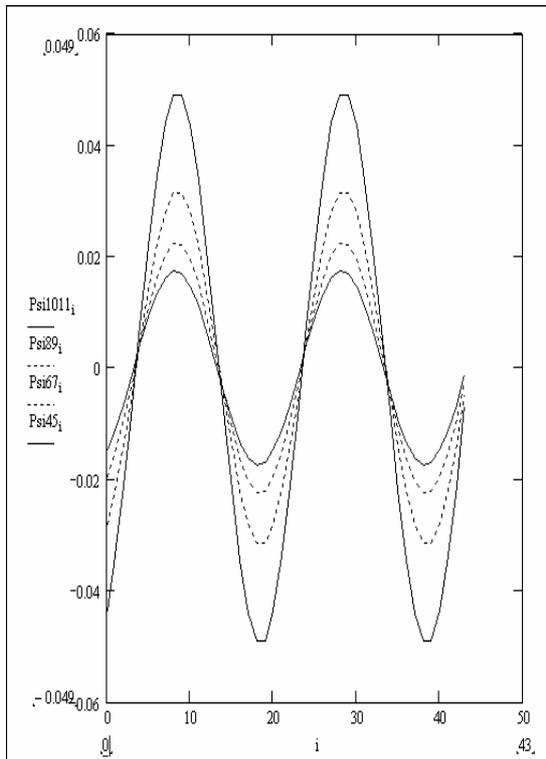


Рис. 6. Изменение потокосцепления обмотки статора при перемещении ротора.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшая ЭДС получается при равном количестве полюсов. Однако, как указывалось, данный вариант не приемлем из-за магнитного залипания статора и ротора. Анализ других вариантов позволяет сделать ряд выводов (рис. 4, 5):

- 1) при данной схеме обмотки любое четное количество пазов дает ЭДС, близкую к нулю;
- 2) при нечетном количестве пазов ЭДС уменьшается с ростом отличия числа пазов и полюсов;

3) наиболее оптимальное соотношение – $Z = 2p \pm 1$, причем при $Z = 2p - 1$ ЭДС чуть больше и достигается большая экономия меди;

Анализ вариантов с оптимальным соотношением числа полюсов и пазов, но при разном числе полюсов (рис. 6, 7) показывает, что с увеличением числа полюсов при данной схеме обмотки статора уменьшается ее потокосцепление. Одновременно с этим увеличивается частота изменения магнитного потока. Совместное влияние этих двух факторов приводит к тому, что величина ЭДС в обмотке статора практически не изменяется. Тем не менее уменьшение числа полюсов приводит все-таки к некоторому росту ЭДС. Уменьшение числа полюсов оказывается предпочтительным также и по технологическим соображениям.

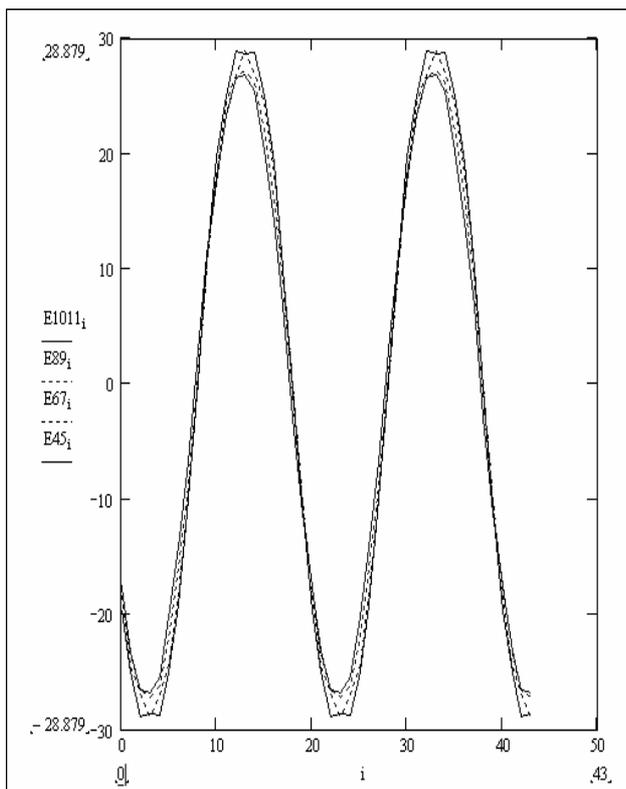


Рис. 7. Изменение ЭДС, наводимой в обмотке статора при перемещении ротора.

Список литературы

- 1. Рубцов Д.В., Шишкин В.П., Тихонов А.И.** Разработка конструкции торцевого ветрогенератора с использованием конечно-элементной модели магнитного поля // «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тезисы докладов одиннадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. К 75-летию МЭИ, Том 2. – Москва, МЭИ, 1–2 марта 2005 г. – С. 32.
- 2. Тихонов А.И.** Библиотека систем моделирования электромеханических устройств. Выставка научных достижений Ивановской области. Ивановский инновационный салон «ИННОВАЦИИ–2004». Каталог экспонатов. – Иваново, 2004.