

ПРОВЕДЕНИЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА АКТИВНОЙ ЧАСТИ ТОРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА В СРЕДЕ ANSYS

Е. В. Карпенко, Н. А. Колбасина, Д. И. Морозов

Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26
E-mail: cat.kras@gmail.com

Объектом исследования является низкоскоростной торцевой синхронный генератор. Обосновывается необходимость и методика проведения проверочных расчетов работоспособности таких генераторов. Конечно-элементный анализ приводится как один из инструментов реализации подобных расчетов, и его результаты для заданных параметров приводятся в конце статьи. Рассматриваются основные этапы проведения расчета и возможности среды ANSYS. Для упрощения работы в среде ANSYS разработан программный продукт, позволяющий строить расчетную модель в автоматизированном режиме. Использование программного продукта может быть полезно для конструкторско-технологических задач производства, повышения конкурентоспособности и спроса на изделие.

Ключевые слова: низкоскоростной торцевой синхронный генератор, метод конечных элементов, автоматизация проектирования.

Vestnik SibGAU
2014, No. 3(55), P. 63–67

STRUCTURAL ANALYSIS IN ANSYS OF THE AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR

E. V. Karpenko, N. A. Kolbasina, D. I. Morozov

Siberian Federal University
26, Kirenskiy St., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: cat.kras@gmail.com

The object of this research is the axial flux permanent magnet generator. In the article the necessity and technique of checking calculations of the generators is described. A finite element analysis is provided as a tool for these calculations. Its results for the specified parameters are at the end of the article. The main stages of the calculation and the possibilities of the environment ANSYS were examined. To simplify the work in the ANSYS environment software that allows you to build a simulation model in an automated mode was developed. Using our software can be useful for design and technological production tasks, improving competitiveness and increasing demand for the product. The resulting computational model in ANSYS environment allows you to get a complete picture of the stress-strain state of the computational model. Developed software as a part of an automated design environment of the generator, greatly simplifies the process of solution, because it requires only the input of the parameters without entering commands in the language APDL. Such automated model significantly reduces the time spent on the construction of computational models, and excludes cases of incorrect commands for environment ANSYS. In the future, this software will significantly simplify the design and testing of new designs generators.

Keywords: axial flux permanent magnet generator, finite element method, computer-aided engineering.

Низкоскоростные торцевые синхронные генераторы находят применение для нужд малой энергетики. Ввиду своих малых осевых размеров и возможности работы на низких оборотах их используют для преобразования энергии движения ветро- или гидротурбины в электрическую энергию. Торцевые генераторы отличаются от традиционных цилиндрических синхронных генераторов направлением магнитного потока

и имеют высокотехнологичную конструкцию и низкую материалоемкость [1]. В торцевых генераторах магнитный поток направлен параллельно оси вращения (аксиально), в то время как в цилиндрических – перпендикулярно оси вращения (радиально).

Существует несколько различных вариантов конструкций торцевых генераторов, неизменным остается то, что во всех топологиях аксиально намагниченные

магниты вмонтированы в круглый диск ротора. Для варианта конструкции с одним ротором и двумя статорами магниты располагаются с двух сторон диска ротора, который размещен между статорами. В такой компоновке на ротор действуют две силы, одинаковые по величине и противоположные по направлению, эти силы компенсируются в случае, если ротор помещен строго посередине между статорами. Оба диска статора также испытывают на себе действие сил.

В компоновке с двумя роторами и одним статором два зеркально расположенных ротора с постоянными магнитами, вмонтированными с одной стороны дисков ротора, установлены на вал. Статор располагается между двумя дисками ротора и испытывает на себе силы, с которыми роторы притягиваются к статору. Если статор расположен не строго посередине между роторами, то действует результирующая сила.

В многоступенчатых топологиях количество роторов на один больше количества статоров. При этом в конструкции используются два типа роторов: внешний (постоянные магниты вмонтированы только с одной стороны диска ротора) и промежуточный (постоянные магниты вмонтированы с двух сторон диска ротора).

В процессе сборки генератора будет действовать максимальная притягивающая сила между статором и ротором. Действие этой силы необходимо учитывать при проведении структурного анализа электрической машины. Для выбора оптимальной конструкции необходимо провести ряд проверочных расчетов для нескольких компоновок машин. Существуют аналитические зависимости, связывающие максимально допустимые деформации с конструктивными размерами. Однако эти выражения не дают возможности быстро и с большой точностью получить результаты. Поэтому чаще используются численные методы решения, например, метод конечных элементов [2]. Программный продукт ANSYS позволяет с достаточным уровнем достоверности оценить влияние притягивающей силы на конструкцию электрической машины, в частности, активную ее часть – статор и ротор. Дальнейший расчет будет проводиться в среде ANSYS.

Среда конечно-элементного анализа ANSYS позволяет получить на выходе из решения файл с расширением «log», хранящий в себе все данные расчетной модели с возможностью их корректировки, написанный на языке APDL. Это позволяет разработать программный продукт для управления параметрами решения. Такой подход позволяет сделать построение расчетной модели автоматизированным, что существенно сокращает затрачиваемое время и не требует высокой квалификации пользователя при работе в среде ANSYS. В некоторых случаях работа в среде ANSYS требует не только достаточных навыков, но и большой внимательности, что затрудняет получение решения в короткие сроки, тогда когда время подчас является критическим фактором. Следует отметить, что программный продукт является частью автоматизированной среды проектирования торцевого генератора [3; 4]. Интерфейс разработанного программного продукта с введенными данными показан на рис. 1.

В программу задаются требуемые геометрические размеры ротора, статора, вала, типы элементов в среде ANSYS, параметры материала, величина силы магнитного притяжения, характеристики подшипников. Также возможна корректировка размерности сетки. Все эти переменные являются параметрами, которые можно изменять и в автоматизированном режиме перестраивать расчетную модель. А регулировка плотности сетки позволяет получить результаты с требуемой точностью. Программный продукт может быть использован в том числе как инструмент для проведения исследований влияния размерности сетки на точность получаемых результатов при проведении расчетов в различных дисциплинах, таких как статика, динамика и анализ электромагнитных процессов. В программе используется буквенный код обозначения номера объема, который позволяет в выходном файле наглядно отслеживать нумерацию создаваемых объемов, а также при дальнейших изменениях конструкции позволяет вставлять новые построения, избегая при этом полной корректировки программного кода. Формируемый программой log-файл содержит в себе процедуру решения задачи в среде ANSYS, которая по шагам описывается ниже.

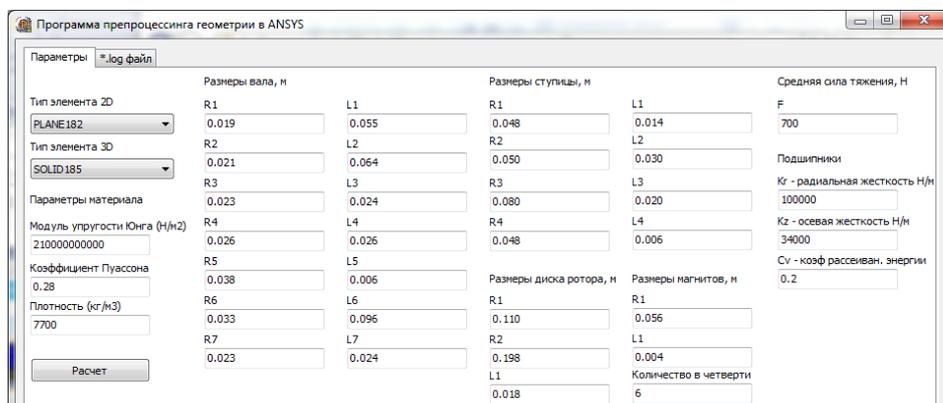


Рис. 1. Интерфейс программного продукта

Выполнение конечно-элементного анализа в среде ANSYS подразумевает выполнение следующих этапов [5]:

- 1) определение типов элементов;
- 2) задание свойств материалов;
- 3) создание расчетной параметризованной модели;
- 4) разбиение на конечно-элементную сетку;
- 5) приложение нагрузок и ограничений;
- 6) выполнение расчета;
- 7) просмотр результатов.

Для решения задачи использованы следующие элементы: плоский PLANE182 и объемный SOLID185. Элемент PLANE182 предназначен для двумерного моделирования плоско-деформируемых или осесимметричных задач. Элемент состоит из четырех узлов, имеющих 2 степени свободы – перемещение вдоль оси X и Y . В данной задаче плоский элемент используется для разбиения на сетку поверхностей модели с целью последующего экструдирования, что позволяет полностью контролировать процесс создания регулярной объемной сетки с заданными характеристиками. Элемент SOLID185 предназначен для трехмерного моделирования. Элемент состоит из восьми узлов, имеющих 3 степени свободы – перемещение вдоль осей X , Y и Z [6].

В задаче используется модель изотропного материала со следующими характеристиками: Модуль Юнга (Young's Modulus) = $2,1e11$ (Па); коэффициент Пуассона (Poisson's ratio (minor)) = $0,28$; плотность (Mass density) = 7700 (кг/м³) [7].

Для построения расчетной модели конструкция генератора была несколько упрощена. Поскольку основной является величина деформации диска ротора, статоры заменены действием сил магнитного притяжения по обеим сторонам диска ротора. Неизменными в расчетной модели (рис. 2) остаются вал, ступица, диск ротора и магниты.

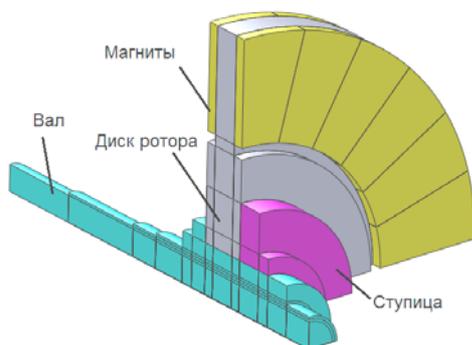


Рис. 2. Расчетная модель торцевого генератора с одним ротором и двумя статорами

Расчетная модель имеет две плоскости симметрии и ось вращения. Для расчета методом конечных элементов необходимо создание сеточной модели, т. е. замена твердотельной модели набором конечных элементов. В основу разбиения сетки положено разбиение торца вала. С учетом полученных элементов

генерируется трехмерная сетка для всей четверти модели (рис. 3).

Параметризация геометрии позволяет организовать процесс поиска нужного узла или другого объекта, в том числе в зависимости от координат, и реализовать оптимизацию по заданным критериальным ограничениям и параметрам. Такой принцип построения позволяет задавать нагрузку в каждом узле и выполнять требования к качеству сетки. Сетка проверяется на отсутствие вырожденных углов, на точность стыковки узлов сетки в сегментах модели и др.

Так как диаметр вала в несколько раз меньше диаметра диска ротора, появилась необходимость в применении шаблона соединения частей сетки, без которого размеры элементов увеличивались бы с увеличением диаметра, что привело бы к огрублению результатов.

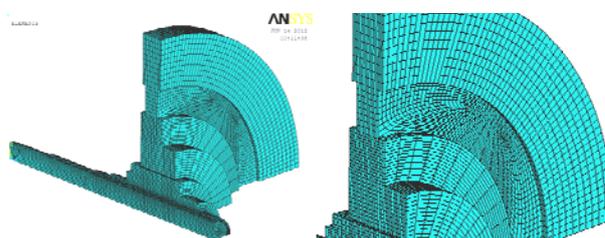
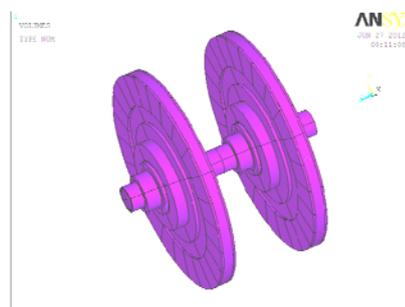
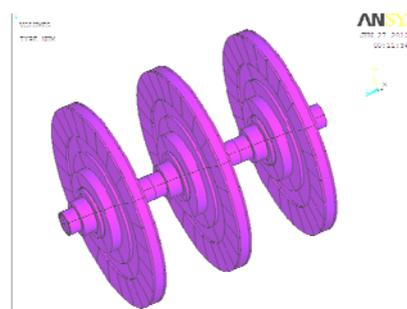


Рис. 3. Конечно-элементная сетка

Путем варьирования количества ступеней генератора создается расчетная модель генератора большей мощности (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Расчетная модель двух- (а) и трехступенчатых (б) генераторов

Помимо количества ступеней существует возможность создать расчетную модель активной части торцевого генератора, варьируя следующими параметрами:

- 1) количество магнитов;
- 2) одностороннее или двустороннее приложение сил в зависимости от наличия в конструкции статора с одной стороны или с двух сторон от диска ротора;
- 3) геометрические параметры и др.

Сила магнитного притяжения на постоянных магнитах для анализа напряженно-деформированного состояния активной части генератора может быть получена из трех источников: из натурального эксперимента, по расчетной теоретической модели, из численного анализа электромагнитных процессов в генераторе. Для примера приведен случай использования экспериментальных данных силы магнитного притяжения, а именно, максимального и минимального значения силы для торцевого генератора мощностью 1 кВт с одним ротором и одним статором (рис. 5).

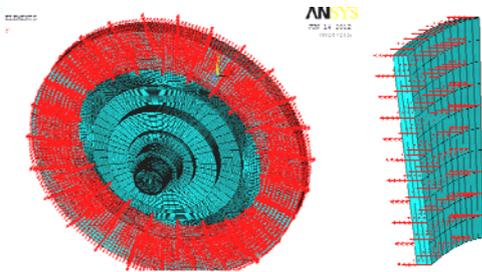


Рис. 5. Приложение силы притяжения на магниты ротора

Непосредственное значение сил рассчитывалось по следующей методике. Для случая, когда известны значения максимальной и минимальной сил притяжения, значение силы в узлах определяется по формуле

$$F_i = \frac{1}{2} \cdot (F_{\max} + F_{\min}) + \frac{1}{2} \cdot (F_{\max} - F_{\min}) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot i}{P}\right),$$

где F_i – сила притяжения i -го магнита, Н; F_{\max} – максимальная сила притяжения, Н; F_{\min} – минимальная сила притяжения, Н; P – число пар полюсов.

Для случая, когда известна средняя сила притяжения, значение силы в узлах магнитов определяется по формулам

$$F_i = F_0 + \Delta F \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot i}{P}\right),$$

$$\Delta F = F_0 \cdot R \cdot \sin \alpha,$$

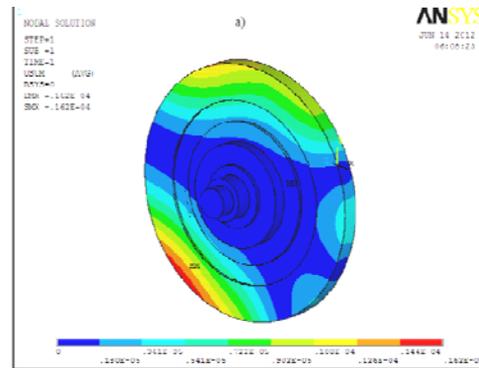
где α – начальный угол перекоса диска под влиянием технологических погрешностей; F_0 – средняя сила, Н.

Ограничениями для вала являются подшипниковые опоры. Существует возможность как задать их жестко, так и задать радиальную и осевую жесткость. Как показали результаты исследования, выбор способа задания подшипниковых опор существенно не влияет на суммарные деформации.

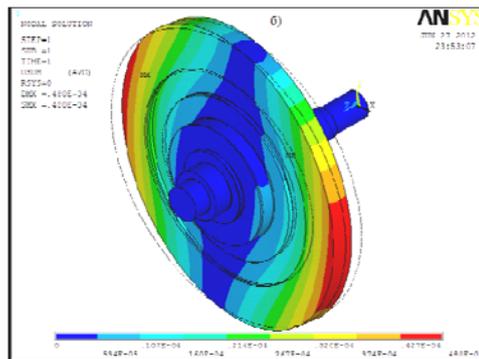
Структурный анализ позволяет получить на выходе значения напряжений, деформаций и перемещений в расчетной модели. Поскольку ставится задача проверки соблюдения зазора между статором и ротором,

анализируются значения суммарных перемещений под действием силы магнитного притяжения.

По результатам решения суммарные перемещения для одного диска ротора (рис. 6) без учета начального перекоса диска составляют не более 0,016 мм (рис. 6, а). С учетом начального перекоса величина суммарных перемещений возрастает и составляет не более 0,048 мм (рис. 6, б).



а



б

Рис. 6. Суммарные перемещения для одного диска ротора

При анализе конструкции, состоящей из двух роторов, на валу суммарные перемещения составили не более 0,001 мм без учета начального перекоса и не более 0,048 мм с учетом начального перекоса дисков роторов.

Полученная расчетная модель в среде ANSYS позволяет получить полную картину напряженно-деформированного состояния расчетной модели. Разработанный программный продукт как часть автоматизированной среды проектирования торцевого генератора существенно упрощает процесс проведения решения, поскольку требует ввода лишь входных параметров без ввода команд на языке APDL. Такое автоматизированное построение модели существенно сокращает время, затрачиваемое на построение расчетной модели, и исключает случаи некорректного написания команд для среды ANSYS. В дальнейшем этот программный продукт существенно упростит проектирование и проверку новых конструкций торцевых генераторов.

Библиографические ссылки

1. Электромагнитная модель и оптимизация параметров торцевого генератора / А. Л. Встовский [и др.]. // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук, 2012. Т. 14, № 1–2. С. 653–657.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 543 с.
3. Карпенко Е. В., Карпенко В. В., Головин М. П. Автоматизация проектирования торцевых генераторов мощностью до 20 кВт // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 28–34.
4. Морозов Д. И., Карпенко Е. В., Колбасина Н. А. Оптимизационный синтез параметров низкоскоростного торцевого синхронного генератора // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 1 (41). С. 38–42.
5. Басов К. А. ANSYS в руках инженера. М. : КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
6. Чигарев А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров : справ. пособие. М. : Машиностроение-1, 2004. 512 с.
7. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М. : Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

References

1. Vstovskiy A. L., Golovin M. P., Fediy K. S., Kolbasina N. A., Morozov D. I. [Electromagnetic model and

optimization parameters of the face generator]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. Samara, 2012, Vol. 14, no. 1–2, p. 653–657. (In Russ.)

2. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in the engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975, 543 p.

3. Karpenko E. V., Karpenko V. V., Golovin M. P. [Automation of design of butt generators with the capacity up to 20 kW]. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2(48), p. 28–34. (In Russ.)

4. Morozov D. I., Karpenko E. V., Kolbasina N. A. [Optimizing synthesis of a low-speed butt alternator characteristics]. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 1(41), p. 38–42. (In Russ.)

5. Basov K. A. *ANSYS v rukakh inzhenera* [ANSYS in the hands of the engineer]. Moscow, Komp'yuterPress Publ., 2002, 224 p.

6. Chigarev A. V., Kravchuk A. S., Smalyuk A. F. *ANSYS dlja inzhenerov. Spravochnoe posobie* [ANSYS to engineers. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004, 512 p.

7. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'eva M. A. *ANSYS v rukah inzhenera. Prakticheskoe rukovodstvo* [ANSYS in the hands of the engineer. A practical guide]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003, 272 p.

© Карпенко Е. В., Колбасина Н. А., Морозов Д. И., 2014