

DOI: 10.17516/1999-494X-0427

УДК 621.313.333

Investigation of an Inductor Generator in the ANSYS Maxwell Package

Konstantin S. Fediy*,
Aleksandr N. Pakhomov and Sergey A. Vstovskiy
*Siberian Federal University
Russian Federation, Krasnoyarsk*

Received 05.05.2022, received in revised form 07.09.2022, accepted 19.09.2022

Abstract. The question of studying the magnetic field of electric machines is often complicated by the task of accurately describing the geometry of a magnetic system. The ANSYS Maxwell software package was used to study the inductor generator. This set of programs is designed for modeling electromagnetic fields in the design and study of engine models. Upon completion of the calculations, the user can evaluate the result according to the dependencies of the efficiency coefficient, electric current, loss values, as well as analyze the calculation of the distribution of magnetic induction in the volume of the inductor generator using efficiency maps. Each point on the efficiency map is the result of running optimization for several acceptable operating conditions of the generator. All the actual points that are used to create efficiency maps are determined by solving a large parametric table with all the viable and practical operating conditions of the machine.

Keywords: inductor generator, ANSYS, three-dimensional generator model, finite element model, magnetic induction.

Citation: Fediy, K. S., Pakhomov, A. N., Vstovskiy, S. A. Investigation of an inductor generator in the ANSYS Maxwell package. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2022, 15(6), 702–711. DOI: 10.17516/1999-494X-0427

Исследование индукторного генератора в пакете ANSYS Maxwell

К. С. Федий, А. Н. Пахомов, С. А. Встовский
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Вопрос исследования магнитного поля электрических машин часто затруднён задачей точного описания геометрии магнитной системы. Для изучения индукторного генератора был использован программный пакет ANSYS Maxwell. Этот набор программ предназначен для моделирования электромагнитных полей при проектировании и исследовании моделей двигателей. По завершении расчетов пользователь может оценить результат по зависимостям коэффициента полезного действия, электрического тока, величин потерь, а также провести анализ расчета распределения магнитной индукции в объёме индукторного генератора с помощью карт эффективности. Каждая точка на такой карте является результатом запуска оптимизации по нескольким допустимым условиям работы генератора. Все фактические точки, которые используются при создании карт эффективности, определяются при решении большой параметрической таблицы со всеми жизнеспособными и реализуемыми на практике условиями работы машины.

Ключевые слова: индукторный генератор, ANSYS, трехмерная модель генератора, конечно-элементная модель, магнитная индукция

Цитирование: Федий, К.С. Исследование индукторного генератора в пакете ANSYS Maxwell / К.С. Федий, А.Н. Пахомов, С.А. Встовский // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2022, 15(6). С. 702–711. DOI: 10.17516/1999-494X-0427

Инновационные решения физического моделирования при разработке электрических машин сокращают сроки разработки и количество необходимых физических прототипов за счёт возможности рассмотреть большее число различных вариантов конструкции. Продукты ANSYS обеспечивают широкий диапазон различных расчётов электрических машин [1]: расчёты магнитных полей, тепловые расчёты, расчёт акустики и вибраций, расчёт системной модели взаимодействия электрической машины с управляющей электроникой.

Для исследования индукторного генератора был использован программный пакет ANSYS Maxwell. Этот набор программ предназначен для моделирования электромагнитных полей при проектировании и изучении моделей двигателей, датчиков, трансформаторов и других электрических и электромеханических устройств различного применения. ANSYS Maxwell построен на основных уравнениях Максвелла и для расчетов использует метод конечных элементов (Finite Element Method – FEM), что позволяет рассчитывать электромагнитные и электрические поля.

В пакете программ имеется большая библиотека шаблонов известных электрических машин. Достаточно ввести основные геометрические размеры, материалы, предполагаемые к использованию, и по этим исходным данным выполнить расчёт характеристик исследуемой электрической машины. Есть возможность расчёта и анализа на трёх различных уровнях:

- ускоренный анализ по схемам замещения;
- расчёт методом конечных элементов в двумерной постановке задачи;

– расчёт методом конечных элементов в трехмерной постановке задачи.

В последних двух уровнях существует возможность решения магнитостатической задачи, динамической задачи, есть возможность подключения электрической схемы системы, а значит, анализа работы электрической машины при подключении полупроводниковой техники различной нагрузки и т.д.

Индукторный генератор представляет собой бесконтактную, одноименно-полюсную синхронную электрическую машину переменного тока с односторонним электромагнитным возбуждением. Обмотка соединяется в катушки, а катушки в фазы. Фазы обмотки соединены в многоугольник и подключены к трехфазному мостовому выпрямителю [2], как показано на рис. 1.

При исследовании индукторного генератора в пакете ANSYS Maxwell была создана трехмерная модель генератора, номинальные данные которого представлены в табл. 1.

Вопрос исследования магнитного поля электрических машин часто затруднён задачей точного описания геометрии магнитной системы [3]. Программная среда Maxwell в составе библиотеки RMXprt позволяет точно описать особенности геометрии зубцовой зоны для расчёта магнитной индукции, КПД, выпрямленного тока и суммарных потерь с учетом гармонических составляющих. При описании геометрии магнитной системы есть возможность поддержки систем автоматизированного проектирования, т.е. модель может быть выполнена в любом CAD-приложении, например в SolidWorks (рис. 2).

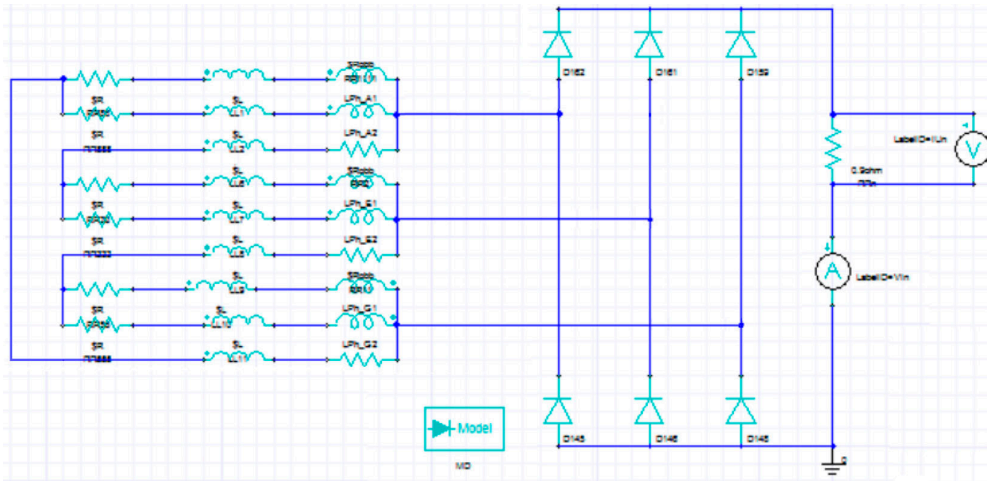


Рис. 1. Схема соединения обмотки генератора к выпрямителю и нагрузке

Fig. 1. Connection diagram of the generator winding to the rectifier and load

Таблица 1. Исходные данные генератора

Table 1. Initial data of the generator

Номинальная мощность P_H , Вт	Номинальное напряжение U_H , В	Число пар полюсов $2p$	Активный диаметр D_i , м	Величина воздушного зазора δ , м	Плотность тока j , А/мм ²
3000	220	12	0,45	0,001	4,5

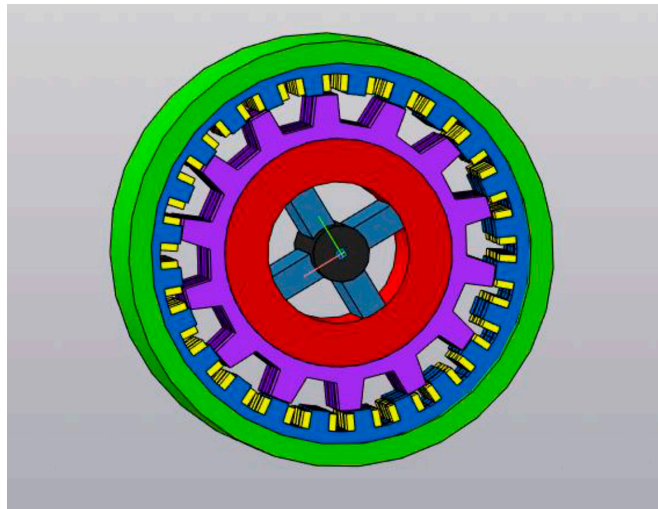


Рис. 2. Трехмерная модель в пакете SolidWorks

Fig. 2. Three-dimensional model in the SolidWorks package

Во вкладке «Modeler» раздела статора указываем материал, из которого изготовлен статор, тип обмотки, число параллельных ветвей, количество элементарных проводников, шаг обмотки, коэффициент заполнения паза медью и материал, из которого изготовлена обмотка статора (рис. 3).

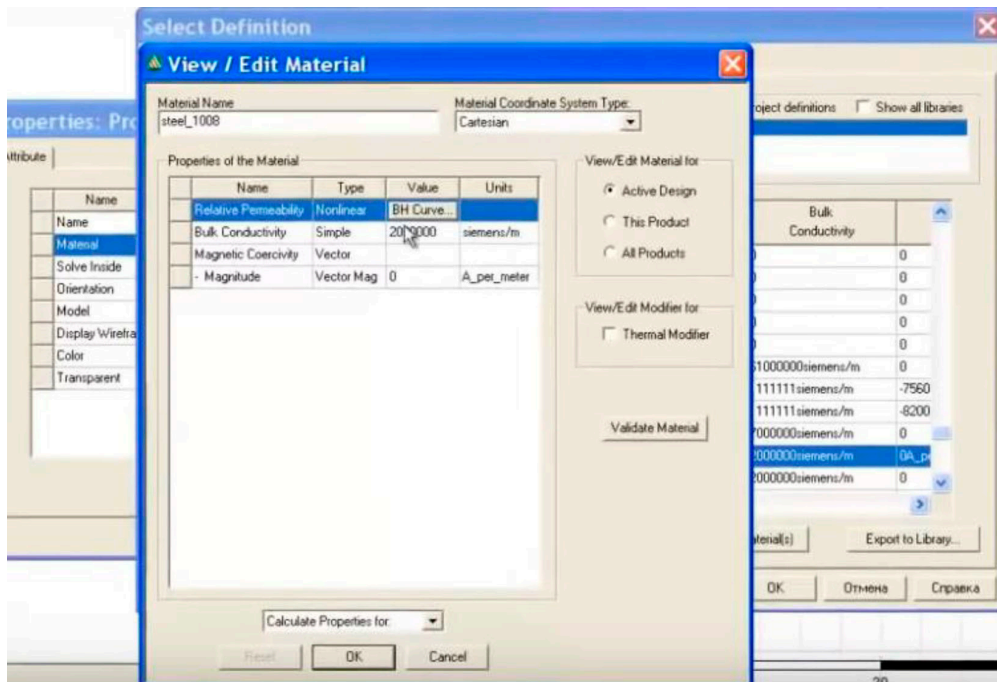


Рис. 3. Свойства статора

Fig. 3. Stator properties

Далее указываем данные для ротора. Все действия выполняются аналогично моделированию статора. После окончания моделирования статора производится переход во вкладку «Setup» – «Analyze setup». В этой вкладке содержится информация о номинальном выходном напряжении и номинальной скорости вращения.

В конечно-элементной модели использована геометрия одного пакета на одно полюсное деление машины с применением симметричных граничных условий для уменьшения числа конечных элементов и времени расчета (рис. 4). Для достаточной точности вычислений расчетная область разбита на 11 208 конечных элементов.

Далее для расчета распределения магнитной индукции в номинальном режиме работы была выставлена длительность рассчитываемого установившегося режима работы машины 0.3 с при шаге расчета по времени 200 мкс.

Анализ расчета распределения магнитной индукции (рис. 5) показывает, что результаты расчета магнитной индукции в зазоре ANSYS Maxwell соответствуют аналитическим решениям [4]. При проведении теоретических исследований установлено, что неправильный подбор материалов искажает картину электромагнитного поля, что естественно влияет на результаты расчета.

В 19 версии ANSYS в рамках продукта ANSYS Maxwell появился новый инструмент, направленный на разработку электрических машин с широким диапазоном эксплуатационных режимов по скорости, крутящему моменту, электрическому току и т.д. При разработке таких электродвигателей и их контроллеров конструкторы сталкиваются с рядом проблем. В частности, затруднительны вопросы оптимизации под широкий диапазон режимов.

Конструкция, оптимизированная для низких оборотов и высокого крутящего момента, будет далека от совершенства при эксплуатации на высоких оборотах. Кроме того, возникает

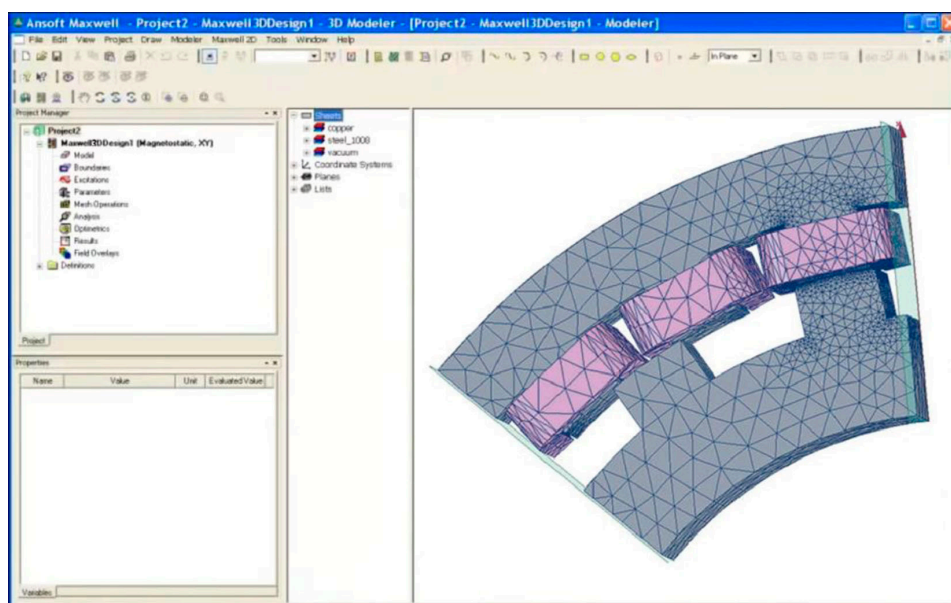


Рис. 4. Модель одного пакета на одно полюсное деление машины

Fig. 4. Model of one package per pole division of the machine

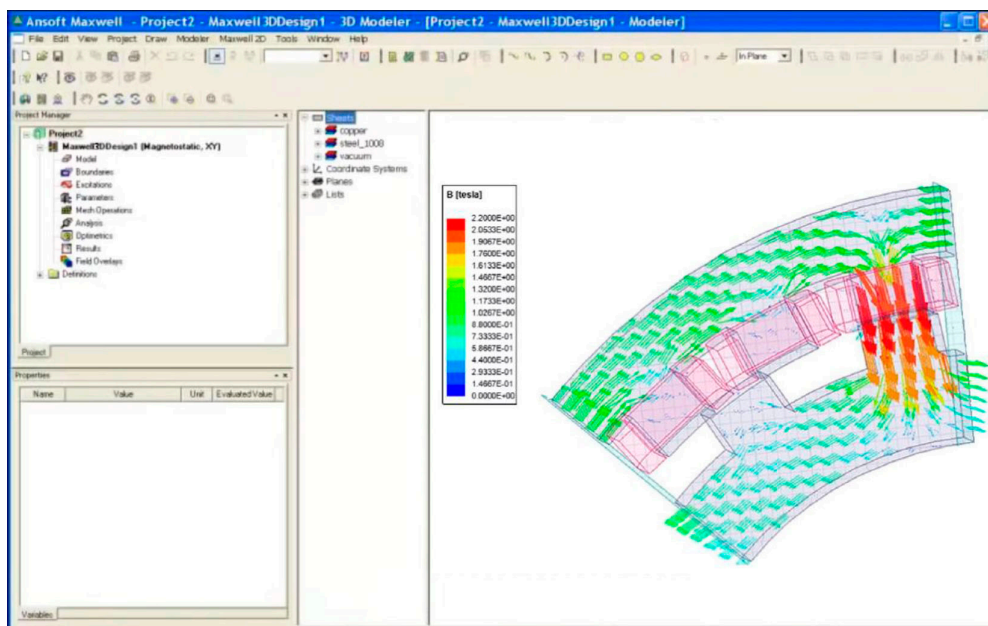


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в активном объёме машины

Fig. 5. Distribution of magnetic induction in the active volume of the machine

вопрос об оптимальных алгоритмах управления генератором на заданных оборотах и крутящем моменте [5]. Таким образом, для разработки подобных электрических машин инженеры должны не только располагать точными результатами моделирования по какому-то конкретному режиму, но и понимать поведение машины в широком диапазоне режимов. Набор инструментов Machine Toolkit призван решать такие задачи. Эти инструменты являются бесплатным дополнением к базовому функционалу продукта Maxwell и позволяют инженерам строить диаграммы энергоэффективности для всего диапазона эксплуатационных режимов. Набор Machine Toolkit создан с учётом типовых вопросов, возникающих у конструкторов электрических машин.

Данные, которые необходимо ввести, включают:

- тип машины;
- характеристики машины (количество полюсов, максимальный ток, максимальные обороты, тип контроллера);
- параметры точности результатов (количество шагов на диапазонах оборотов, крутящего момента).

На основе введенной информации запускается процесс расчёта параметрической модели в заданном диапазоне режимов. Для решения поставленной задачи обычно необходимо провести несколько сотен нестационарных расчётов. При помощи Machine Toolkit они запускаются автоматически. Общее время расчёта может быть значительно уменьшено благодаря использованию параллельных вычислений. Расчёты при различных параметрах можно запускать не последовательно, а одновременно, используя различные ядра рабочей станции или счётного кластера. При этом обеспечивается отличная масштабируемость – использование

10 ядер вместо одного ускоряет расчёт примерно в 9 раз, а использование 100 ядер – примерно в 90 раз.

Для удобства анализа множества расчётов применяют карты эффективности. Каждая точка на карте эффективности является результатом запуска оптимизации по нескольким допустимым условиям работы генератора. Все фактические точки, которые используются при создании карт эффективности, определяются при решении большой параметрической таблицы со всеми жизнеспособными и реализуемыми на практике условиями работы машины.

По завершении расчётов автоматически формируется сводная информация о параметрах производительности электрической машины на каждом режиме и запускается процесс многокритериальной оптимизации. По окончании процесса оптимизации пользователь может оценить результат по зависимостям коэффициента полезного действия, электрического тока, величин потерь и т.д. Ниже представлены зависимости коэффициента полезного действия для индукторного генератора от скорости и крутящего момента (рис. 6), выпрямленного тока (рис. 7) и суммарных потерь (рис. 8).

По оси X откладывается скорость генератора в оборотах в минуту, по оси Y – крутящий момент в Н·м. График показывает, что данный генератор обладает наибольшей эффективностью в диапазоне от 130 до 240 оборотов в минуту и при крутящем моменте от 280 Н·м до 350 Н·м.

Для проверки качества расчёта, выполненного программным пакетом, был проведён проверочный расчёт индукторного генератора по известным методикам [6].

В ходе проверки были рассчитаны потери в электрической машине, индукция в магнитном зазоре, номинальный момент и ток фазы идеализированной системы. На основе полученных данных была вычислена относительная погрешность (табл. 2).

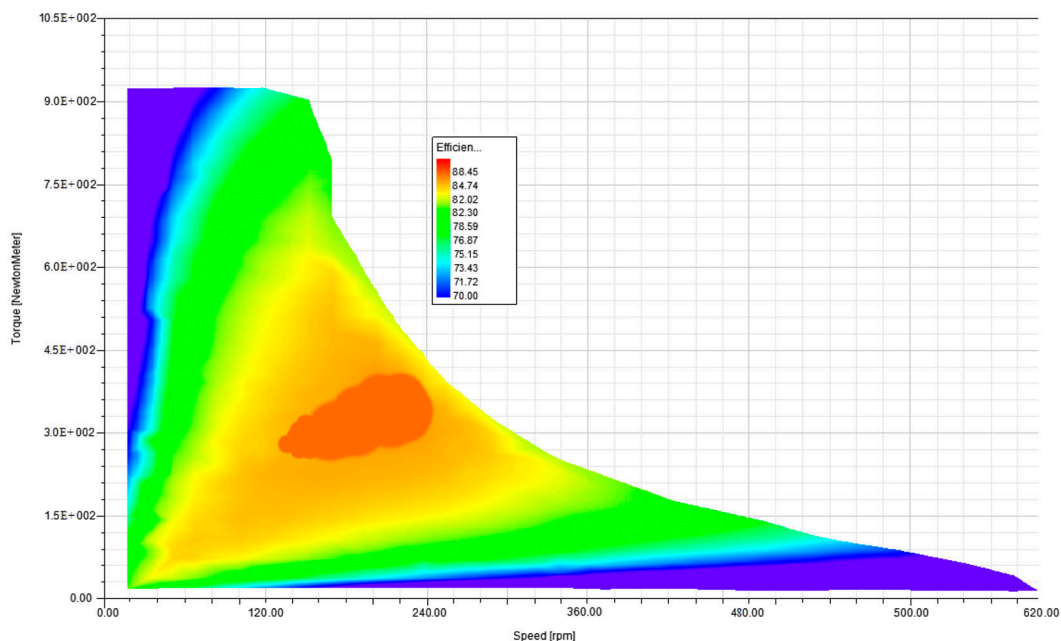


Рис. 6. КПД для индукторного генератора от скорости и крутящего момента

Fig. 6. Efficiency for an inductor generator from speed and torque

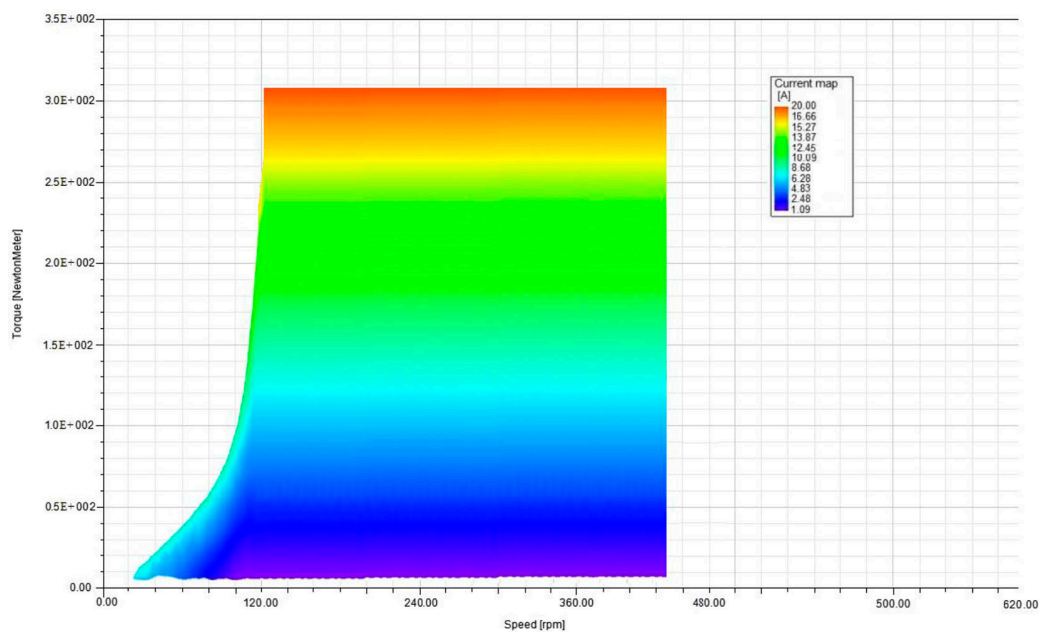


Рис. 7. Зависимость выпрямленного тока от скорости и крутящего момента

Fig. 7. Dependence of the rectified current on speed and torque

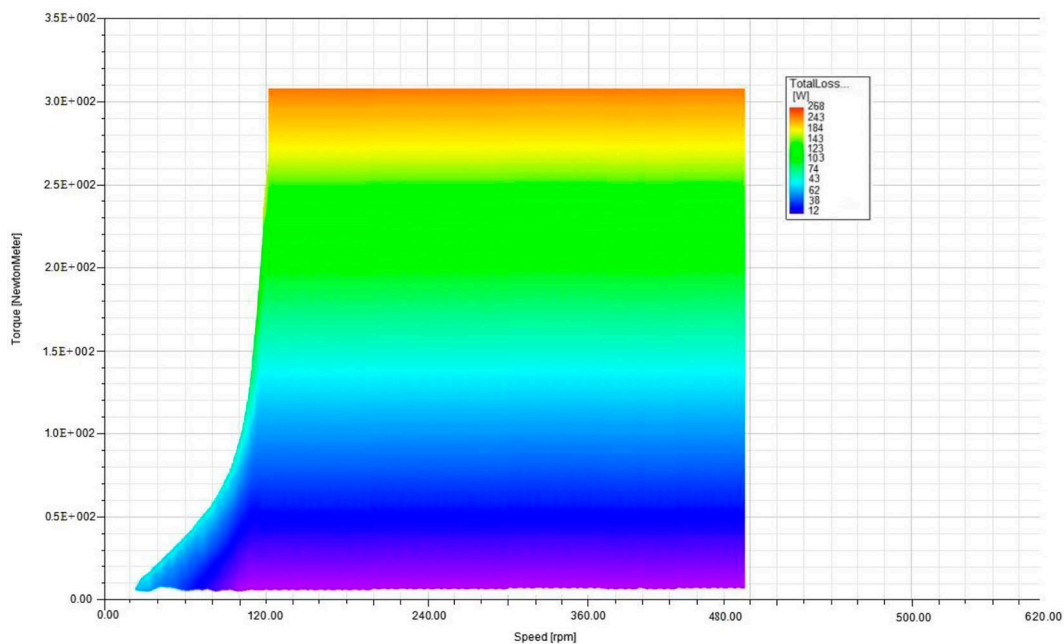


Рис. 8. Зависимость суммарных потерь от скорости и крутящего момента

Fig. 8. Dependence of total losses on speed and torque

Таблица 2. Сравнение основных результатов аналитического расчета с программным комплексом Maxwell

Table 2. Comparison of the main results of the analytical calculation with the Maxwell software package

Сравниваемый параметр	ANSYS Maxwell	Аналитический расчёт	Относительная погрешность, %
Индукция в воздушном зазоре, Тл	1,73	1,65	4,84
КПД, %	88,4	86,3	2,43
Средневыпрямленный ток фазы, А	18,7	17,8	5,05
Суммарные потери, Вт	258	249	3,61

Аналитический расчёт полностью подтвердил результаты расчёта с помощью программы ANSYS Maxwell, которая позволила представить картину распределения магнитного поля в индукторном генераторе, оценить величину магнитной индукции, КПД, средневыпрямленного тока и суммарных потерь.

Анализируя результаты проделанной работы по расчету электрической машины, можно сделать следующие выводы:

- точность расчёта электрических машин в программном пакете ANSYS Maxwell не уступает точности вычислений традиционными методиками [7];
- для выполнения первоначально оценочного расчёта электромеханической системы и определения основных размеров целесообразно воспользоваться упрощёнными оценочными методиками проектирования;
- для анализа и проверки расчётов, проведения оптимизации следует использовать современное программное обеспечение, что даёт высокую точность вычислений и быстроту проведения работ.

Список литературы / References

[1] Буль О.Б. *Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS*, учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2006. 288 с. [Bul O.B. *Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. ANSYS program*. Moscow: Academy, 2006. 288 p.].

[2] Молодецкий В.Б., Федий К.С., Перфильев Д.А. Исследование электромагнитных процессов и методика расчета основных схем выпрямителей. *Технические науки: научные приоритеты учёных*: сб. науч. трудов по итогам междунар. науч.-практ. конф.г. Пермь, 2017. № 2. 71 с. [Molodetsky V.B., Fediy K.S., Perfiliev D.A. Investigation of electromagnetic processes and calculation methods of basic rectifier circuits. Perfiliev. *Technical sciences: scientific priorities of scientists*. Perm, 2017, 2. 71 p.].

[3] Встовский А.Л., Головин М.П., Федий К.С., Колбасина Н.А., Морозов Д.И. Электромагнитная модель и оптимизация параметров торцевого генератора. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012. Т. 14, 1(2) [Vstovsky A.L., Golovin M.P., Fediy K.S., Kolbasina N.A., Morozov D.I. Electromagnetic model and optimization of parameters of the end generator. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy science*, 2012, 14, 1(2)].

[4] Встовский А. Л., Пантелеев В.И., Федий К.С. Анализ магнитного поля торцевого синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением. *Материалы IV Международ. науч.-практ. конф. «Электромеханические преобразователи энергии»*. Томск, 2009 [Vstovsky A.L., Panteleev V.I., Fediy K.S. Analysis of the magnetic field of an end synchronous generator with magnetolectric excitation. A.L. Vstovsky, V.I. Panteleev, K.S. Fediy. *Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference “Electromechanical energy converters”*. Tomsk, 2009].

[5] Бычков В.М., Встовский А. Л., Пантелеев В. И., Федий К. С. Низкоскоростной генератор и система управления режимами его работы. *Известия высших учебных заведений «Электромеханика»*, 2010, 3 [Bychkov V. M., Vstovsky A. L., Panteleev V. I., Fediy K. S. Low-speed generator and control system of its operation modes. *Izvestia of higher educational institutions “Electromechanika”*, 2010, 3].

[6] Встовский А. Л., Федий К.С. Анализ и расчет синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов. *Оптимизация режимов работы электротехнических систем: межвуз. сб. ст.* Красноярск, ИПЦ КГТУ, 2006 [Vstovsky A. L., Fediy K. S. Analysis and calculation of synchronous machines with excitation from permanent magnets. *Optimization of operating modes of electrical systems*. Krasnoyarsk, 2006].

[7] Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. *Проектирование электрических машин: справочник по электрическим машинам*, под ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. М.: Высш. шк., 2001 [Goldberg O. D., Gurin Ya. S., Sviridenko I. S. *Design of electrical machines*. Ed. by I. P. Kopylov, B. K. Klokov. Moscow: Higher school, 2001. Vol. 2].