



ANSYS MAXWELL dasturida chekli elementlar usulidan foydalangan holda elektromagnit qo'zg'atishli sinxron motorlarning magnit oqimi va statik xarakteristikalarini tahlil qilish

Nurali B. Pirmatov^{1, a)}, Allabergen Ye. Bekishev^{1, b)}, Farxod S. Isakov^{1, c)}

^{1, a)} DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; npirmatov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1, b)} PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; allabergenbekisev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1, c)} doktorant, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; isakovfarhod280990@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5692-1381>

Dolzarblik: kompyuterni modellashtirish vositalari va murakkab tahliliy muammolarni hal qilishning raqamli usullarini ishlab chiqish bilan ishlab chiquvchi kundalik amaliyotda foydalanish uchun mos keladigan vositalarni ko'paytirmoqda. Shu bilan birga, ma'lum bir dasturiy ta'minot to'plamining imkoniyatlari to'g'risida etarli ma'lumot yo'qligi sababli berilgan muammoni hal qilishning eng samarali usulini aniqlash juda qiyin. Taklif etilayotgan maqolada (professionallar uchun mo'ljallangan) "Sirdaryo IES" AJ kompressor bloki uchun elektr dvigatelini loyihalash muammosi bilan bog'liq holda elektromagnit qo'zg'atishli sinxron motorlarni tahlil qilish vositasi sifatida ANSYS Maxwell dasturiy majmuasining imkoniyatlari tasvirlangan. Bozorda ishlab chiquvchi va tadqiqotchining eng jiddiy talablariga javob beradigan dasturiy mahsulot mavjudligi ko'rsatilgan, elektromagnit qo'zg'atishli sinxron motorlarni tahlil qilish xususiyatlarini aniqlash va o'rganish uchun dasturiy ta'minot to'plamining turli imkoniyatlari ko'rsatilgan. Dasturiy ta'minot to'plami va ekvivalent sxemalar yordamida hisoblashning an'anaviy usullari yordamida amalga oshirilgan hisob-kitoblarni taqqoslash natijalari tasvirlangan dasturiy ta'minot to'plamini hisoblash sifatini ko'rsatadi, bu uning nafaqat elektr mashinalarini loyihalashda, balki turli elektromexanik qurilmalarda elektromagnit jarayonlarni o'rganishda foydalanish uchun yaroqliligini tasdiqlaydi.

Maqsad: ushbu maqolaning maqsadi o'quvchini elektromagnit hisoblar uchun ANSYS Maxwell dasturiy paketidan foydalanib, elektromagnit qo'zg'atishli sinxron motorlarning magnit oqimi va statik xususiyatlarini tahlil qilishning zamonaviy usullari bilan tanishtirishdir.

Usullar: maqolada mashinaning ishlash ko'rsatkichlarini hisoblash uchun ekvivalent magnit sxema usuli va elektr mashinalarining klassik analitik nazariyasi qo'llaniladi, bu esa modelni tahlil qilish va natijalarni ancha tezroq olish imkonini beradi. Yuqori ishlab chiqarish qobiliyati, tuzilishining soddaligi, tasdiqlangan ishlab chiqarish usullari va yakor reaksiyasining ahamiyatsiz ta'siri tufayli asosiy mashina sifatida elektromagnit qo'zg'atkichli sinxron dvigatel tanlangan.

Natijalar: dasturiy ta'minot to'plami tomonidan amalga oshirilgan hisob-kitoblarning sifatini tekshirish uchun ma'lum usullar yordamida elektromagnit qo'zg'atishli sinxron motorning sinovi o'tkazildi. Sinov davomida elektr mashinasida magnit zanjir va isroflar hisoblab chiqildi, idealashtirilgan tizimning kuchlanish va toklarining ossilogrammalari hamda ish xarakteristikasi tuzildi.

Kalit so'zlar: ANSYS Maxwell, sinxron motor, elektr mashinalarining xarakteristikalarini tahlili, elektromagnit qo'zg'aluvchan elektr mashinalarini hisoblash.

For citation: Pirmatov N.B, Bekishev A.E, Isakov F.S. Analysis of magnetic flux and static characteristics of synchronous motors with electromagnetic excitation using the finite element method in the ANSYS MAXWELL program. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2024, no. 3, pp. 76-83.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14032758>

Received: 10.09.2024

Revised: 20.09.2024

Accepted: 21.10.2024

Published: 02.11.2024

Copyright: © Nurali B. Pirmatov, Allabergene E. Bekishev, Farxod S. Isakov, 2024. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Анализ магнитного потока и статических характеристик синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением с помощью метода конечных элементов в программе ANSYS MAXWELL

Нурали Б. Пирматов^{1, a)}, Аллаберген Е. Бекишев^{1, b)}, Фарход С. Исаков^{1, c)}

^{1, a)} д.т.н., проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; npirmatov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1, b)} PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; allabergenbekisev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3019-2050>

^{1, c)} докторант, Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, 100095, Узбекистан; isakovfarhod280990@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5692-1381>

Актуальность: с развитием средств компьютерного моделирования и численных методов решения сложных аналитических задач у разработчика появляется все больше инструментов, пригодных для применения в повседневной практике. При этом часто трудно определить наиболее эффективный путь



решения поставленной задачи по причине недостаточной информации о возможностях того или иного программного пакета. Предлагаемая статья описывает возможности программного комплекса ANSYS Maxwell в качестве инструмента для анализа синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением применительно к задаче проектирования электрического двигателя для компрессорной установки в АО «Сырдарья ТЭС». Показано, что на рынке существует программный продукт, удовлетворяющий самым серьезным требованиям разработчика и исследователя, продемонстрированы различные возможности программного комплекса для определения и исследования характеристик, анализа синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением. Приведены результаты сравнения расчетов, выполненных с помощью программного комплекса и традиционных методик расчета по схемам замещения, демонстрирующие качество расчета описываемого программного комплекса, что подтверждает пригодность его для применения не только при проектировании электрических машин, но и при исследовании электромагнитных процессов в различных электромеханических устройствах.

Цель: целью данной статьи является знакомство с современными способами анализа магнитного потока и статическими характеристиками синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением использованием программного пакета электромагнитных расчетов ANSYS Maxwell.

Методы: в статье, для вычисления рабочих характеристик машины используется метод эквивалентной магнитной цепи и классическая аналитическая теория электрических машин, что позволяет намного быстрее проанализировать свойства модели и дать результат. Для выбора основного варианта был использован метод сравнительного анализа, благодаря которому был выбран синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением высокой технологичности, простотой конструкции, с отработанной методикой производства, несущественным воздействием реакции якоря.

Результаты: для проверки качества расчета, выполненного программным пакетом, был проведён проверочный расчёт синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением по известным методикам. В ходе проверки были рассчитаны магнитная цепь и потери в электрической машине, построены рабочие характеристики и осциллограммы напряжений и токов идеализированной системы.

Ключевые слова: ANSYS Maxwell, синхронный двигатель, анализ характеристик электрических машин, расчет электрических машин с электромагнитным возбуждением.

Analysis of magnetic flux and static characteristics of synchronous motors with electromagnetic excitation using the finite element method in the ANSYS MAXWELL program

Nurali B. Pirmatov^{1, a)}, Allabergene E. Bekishev^{1, b)}, Farkhod S. Isakov^{1, c)}

^{1, a)} DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; npirmatov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5212-2593>

^{1, b)} PhD., Assoc., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; allabergenbekisev@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3019-2050>

^{1, c)} doctoral student, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; isakovfarkhod280990@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-5692-1381>

Relevance: with the development of computer modeling tools and numerical methods for solving complex analytical problems, the developer has more and more tools suitable for use in everyday practice. At the same time, it is often quite difficult to determine the most effective way to solve a given problem due to insufficient information about the capabilities of a particular software package. The proposed article (intended for) describes the capabilities of the ANSYS Maxwell software package as a tool for analyzing synchronous motors with electromagnetic excitation as applied to the problem of designing an electric motor for a compressor unit at JSC Sirdarya TPP. It is shown that there is a software product on the market that meets the most serious requirements of the developer and researcher, various capabilities of the software package for determining and studying the characteristics of the analysis of synchronous motors with electromagnetic excitation are demonstrated. The results of a comparison of calculations performed using the software package and traditional calculation methods using equivalent circuits are presented, demonstrating the quality of the calculation of the described software package, which confirms its suitability for use not only in the design of electrical machines, but also in the study of electromagnetic processes in various electromechanical devices.

Aim: the objective of this article is to introduce the reader to modern methods of analyzing the magnetic flux and static characteristics of synchronous motors with electromagnetic excitation using the ANSYS Maxwell software package for electromagnetic calculations as an example.

Methods: the article uses the equivalent magnetic circuit method to calculate the operating characteristics of the machine and the classical analytical theory of electrical machines, which allows for a much faster analysis of the model and the result. A synchronous motor with electromagnetic excitation was chosen as the main option due to its high technology, simplicity of design, proven production methodology, and insignificant effect of the anchor reaction.

Results: to check the quality of the calculation performed by the software package, a test calculation of a synchronous motor with electromagnetic excitation was carried out using known methods. During the test, the magnetic circuit and losses in the electric machine were calculated, operating characteristics and oscillograms of voltages and currents of an idealized system were constructed.



Keywords: ANSYS Maxwell, synchronous motor, analysis of electrical machine characteristics, calculation of electrical machines with electromagnetic excitation.

1. Введение (Introduction)

В последнее десятилетие все более популярными становятся специальные программные комплексы для расчета параметров электромагнитных полей. Одним из мощнейших инструментов для решений этой задачи является программа Maxwell от компании Ansys.

ANSYS Maxwell - это ведущее программное обеспечение для моделирования двумерных и трехмерных электромагнитных полей, используемое для исследования и проектирования двумерных и трехмерных моделей, датчиков, трансформаторов, двигателей и других электромеханических и электрических устройств различного применения. Она базируется на методе конечных элементов (Finite Element Method - FEM) и точно рассчитывает гармонические, а также статические электрические и электромагнитные поля и переходные процессы в полевых задачах [1,2].

На сегодняшний день в условиях рынка остро стоят вопросы экономичности и скорости обработки вариантов решений в электромеханической промышленности, то есть необходимо быстро и с минимальными затратами проводить анализ различных электромеханических систем [1,13]. При этом расчёт ручным способом по известным методикам [2,3] трудоемок и требует много времени. Целью данной статьи является использование современных способов анализа магнитного потока и статических характеристик синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением на примере программного пакета для электромагнитных расчетов ANSYS Maxwell [4,14].

Типичным применением этого программного пакета может быть автоматизированный расчет электрических машин с заданными характеристиками [5,15]; например, расчет электрического двигателя для компрессорной установки [6,7]. Изначально на рассмотрение было предложено 3 варианта электрических машин: асинхронный двигатель и два вентильных двигателя с постоянными магнитами; с радиальным магнитным потоком и аксиальным магнитным потоком. По условиям прочности и из-за больших потерь в роторе рассмотрение варианта с асинхронным двигателем было исключено [8,9]. Электрическая машина с аксиальным зазором [10] была оставлена в качестве запасного варианта, несмотря на большую трудоёмкость изготовления, трудности балансировки и, как следствие, дороговизну; однако следует отметить, что при использовании соответствующих технических решений аксиальная машина конкурентоспособна. В качестве основного варианта, благодаря высокой технологичности, простоте конструкции, отработанной методике производства, незначительному воздействию реакции якоря [11,12] был выбран синхронный двигатель с электромагнитным возбуждением.

Таким образом, вышеописанное являлось особенностями поставленной задачи расчётного проектирования синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением. Для исследования возможности ускорения расчета при одновременном повышении точности вычислений и, соответственно, повышения качества проектирования, использовалось современное программное обеспечение - в данном случае программный пакет ANSYS Maxwell [4].

2. Материалы и методы (Materials and Methods)

Используемый набор программ предназначен для моделирования электромагнитных полей при проектировании и исследовании моделей двигателей, датчиков, трансформаторов и других электрических и электромеханических устройств различного применения. ANSYS Maxwell построен на основных уравнениях Максвелла, а для расчетов использует метод конечных элементов Finite Element Method (FEM), что позволяет рассчитывать электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах.

В программном пакете имеется большая библиотека шаблонов известных электрических машин. В этих шаблонах достаточно ввести основные геометрические размеры, вид материалов, предполагаемых к использованию, и по этим исходным данным выполнить расчет характеристик исследуемой электрической машины. Есть возможность расчета и анализа на трёх различных уровнях:

- ускоренный анализ по схемам замещения;
- расчет методом конечных элементов в двумерной постановке задачи;
- расчет методом конечных элементов в трехмерной постановке задачи.

На последних двух уровнях существует возможность решения магнитостатической задачи, динамической задачи, есть возможность подключения электрической схемы системы, как изображено на рис.1, а значит, есть возможность анализа работы электрической машины при подключении полупроводниковой техники, различной нагрузки и т.д.

Учитывая замечания, первостепенной задачей является электромагнитный анализ двигателя,

который успешно может быть выполнен с использованием возможностей дополнения RMXprt. ANSYS. RMXprt — программа, которая ускоряет процесс оптимизации и проектирования вращающихся электрических машин. В ней используется метод эквивалентной магнитной цепи для вычисления рабочих характеристик машины и классическая аналитическая теория электрических машин, что позволяет намного быстрее проанализировать свойства модели и получить результат [2,3].

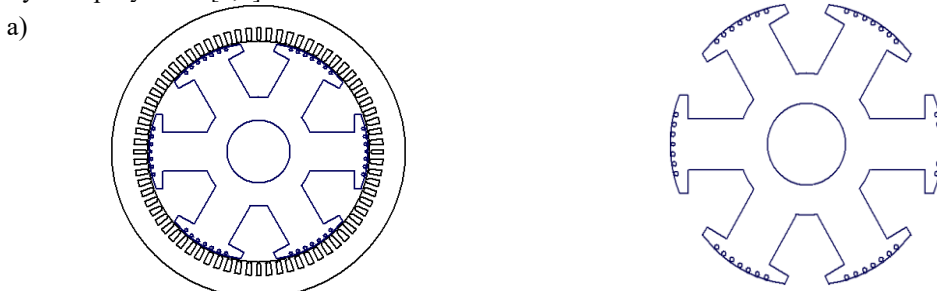


Рис.1. Модель синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением: а) вид статора и ротора, б) вид ротора

Fig.1. Model of a synchronous motor with electromagnetic excitation: a) view of the stator and rotor, b) view of the rotor

Кроме того, имеется возможность ознакомиться с различными осциллограммами, как показано на рис.2, увидеть величину индукции, картину путей замыкания силовых линий потока, как показано на рис.3, произвести расчёт магнитных, электрических потерь, а также потерь, вызванных генерацией вихревых токов в магнитопроводных частях системы.

3. Результаты исследования (Results)

Для проверки качества расчета, выполненного программным пакетом, был проведён проверочный расчёт синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением по известным методикам [2,3]. В ходе проверки были рассчитаны магнитная цепь и потери в электрической машине, построены рабочие характеристики, осциллограммы напряжений и токов идеализированной системы. Для наглядности результаты расчёта сведены в табл.1.

Вопрос исследования магнитного поля электрических машин, часто затруднён задачей точного описания геометрии магнитной системы (рис.1). В программной среде Maxwell в составе библиотеки RMXprt есть возможность точного описания особенностей геометрии зубцовой зоны и рассчитать характеристики тока, ЭДС и электромагнитного момента 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.

Далее для расчета двигателя были определены свойства материалов всех твердотельных объектов в составе магнитной системы. При проведении теоретических исследований установлено, что неправильный подбор материалов искажает картину электромагнитного поля, что влияет на результаты расчета. Итогом нашей работы стало исследование следующих характеристик синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением: потребляемая мощность, коэффициент полезного действия; номинальные: скольжение, вращающий момент, скорость и данные по электрическому состоянию обмоток ротора и статора (рис.2).

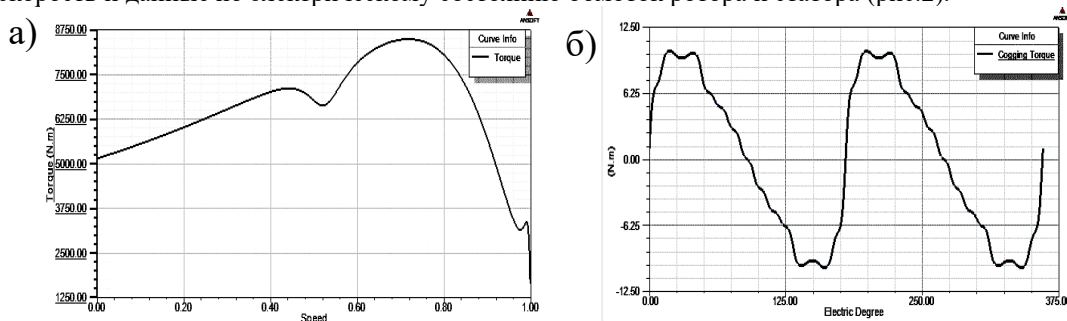


Рис.2. Результаты моделирование в ANSYS MAXWELL: а) Момент, действующий на проводнике демфера [Н·м], б) крутящий момент

Fig. 2. Results of modeling in ANSYS MAXWELL: a) Moment acting on the damper conductor [N·m], b) torque

Анализом влияния геометрических характеристик электродвигателя на его внешние статические характеристики, определяются варианты наиболее эффективного исполнения зубцовой зоны с позиции снижения пульсаций электромагнитного момента. При этом изменяли следующие параметры зубцовой зоны: высота и ширина зубца, число витков в пазе, форма паза, свойства материала магнитопровода ротора. На рисунке ниже представлена картина электромагнитного поля ротора.

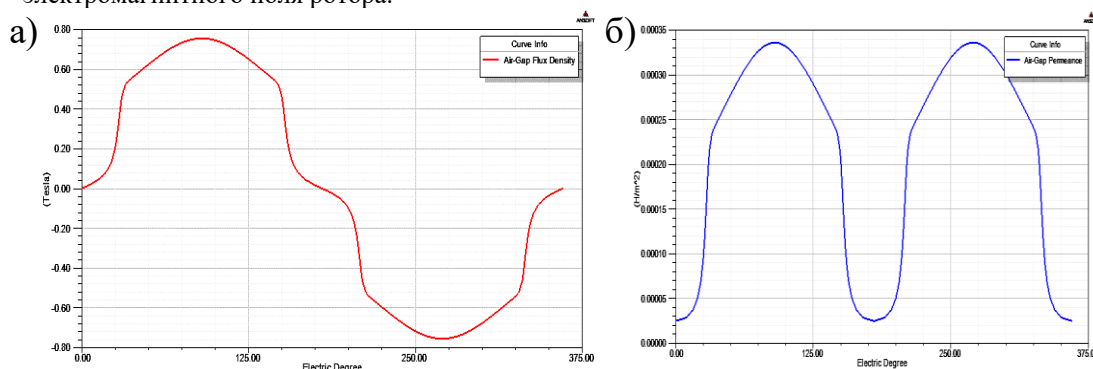


Рис.3. Магнитная поток в воздушном зазоре: а) плотность потока в воздушном зазоре, б) проницаемость потока в воздушном зазоре

Fig.3. Magnetic flux in the air gap: a) flux density in the air gap, b) flux permeability in the air gap

Таблица 1. Сравнение результатов расчетов, выполненных вручную и с применением ANSYS Maxwell

Table 1. Comparison of calculation results performed manually and using ANSYS Maxwell

Сравниваемый параметры	ANSYS Maxwell	Вручную
Индукция в воздушном зазоре, [T]	1.51661	1,5013
Номинальный ток фазы, [A]	776.536	778,25
Номинальный момент, [N·m]	5137.54	5142,69
Магнитные потери, [W]	6484.32	6845,1
Электрические потери, [W]	22751.8	22720,2

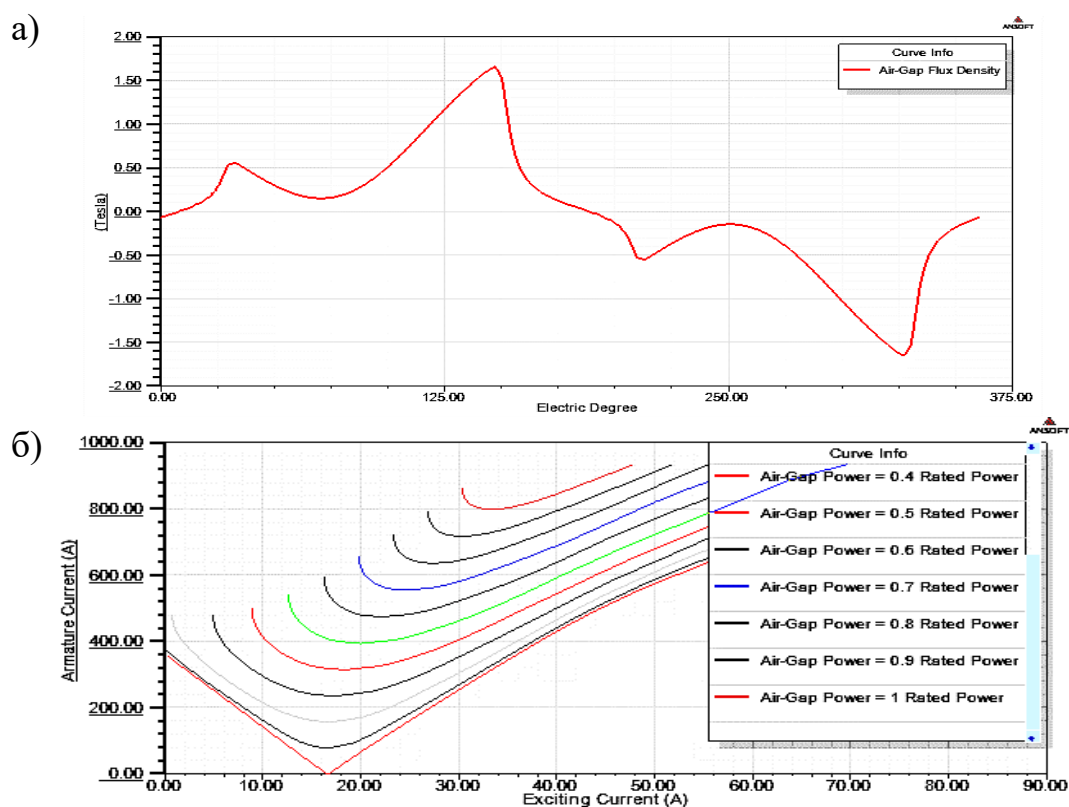


Рис.4. а) Магнитный поток в воздушном зазоре, б) U-образная характеристика двигателя

Fig. 4. a) Magnetic flux in the air gap, b) U-shaped characteristic of the engine

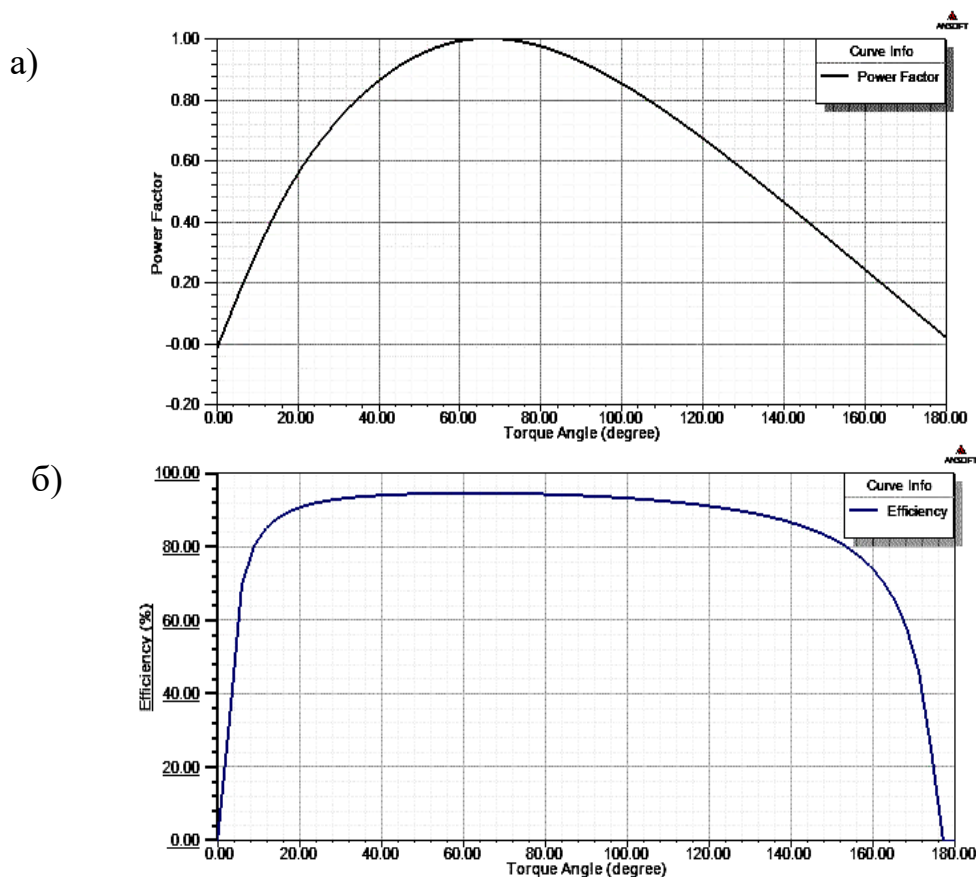


Рис.5. Энергетические показатели двигателя: а) коэффициент мощности, б) коэффициент полезной работы

Fig.5. Engine energy indicators: a) power factor, b) efficiency factor

4. Обсуждение (Discussion)

В целом, использование RMXprt позволяет сократить время исследования режимов работы синхронного электродвигателя в части автоматизированной обработки данных. В тех случаях, когда требуется перейти от аналитического к более точному решению, для детального рассмотрения процессов, происходящих внутри машины, ANSYS RMXprt позволяет перейти к двумерной или трехмерной полевой модели с использованием ANSYS Maxwell 2D/3D.

По полученным с помощью пакета ANSYS Maxwell результатам проектирования и анализа, был изготовлен и испытан двигатель, параметры которого полностью соответствуют расчётным данным.

5. Заключение (Conclusions)

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

- точность расчета электрических машин в программном пакете ANSYS Maxwell не уступает точности вычислений по традиционным методикам расчета;
- для выполнения первоначального оценочного расчета электромеханической системы и определения основных размеров целесообразно воспользоваться упрощенными оценочными методиками проектирования;
- для анализа и проверки расчётов, проведения оптимизации следует применять современное программное обеспечение, которое позволит повысить точность вычислений и ускорить получение практического результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голованов Д.В., Коварский М.Е., Магин В.В., Трунов И.Г. Методы расчета высокоскоростных генераторов для газотурбинных установок. //Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2012. Т. 126, №2, -С. 3-8.



2. Зильберман С.З. Разработка и исследование бесконтактных моментных двигателей постоянного тока: /Автореф. дис. канд. техн. наук. Свердловск, 1978. 14 с.
3. Ганджа С.А., Мартянов А.С. Методика ускоренного расчета синхронных генераторов с аксиальным магнитным потоком. //Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" (ISJAEE). 2014. № 5 (145). -С. 42-44.
4. Клявлин А. Новые возможности ANSYS в области моделирования электромагнитных полей. //САПР и графика. 2012. № 3 (185). -С. 44-46.
5. Антипов В.Н., Данилевич Я.Б. Быстроходные электрические машины для энергетики: состояние и тенденции развития. //Электротехника. 2007. № 6. -С.2-5.
6. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф. Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения. /Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН. Санкт-Петербург, 2009.
7. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф. Микротурбогенераторы повышенной мощности - возможности и перспективы. //Международный журнал "Альтернативная энергетика и экология" (ISJAEE). 2008. № 1. -С. 149-151.
8. Киндряшов А.Н., Мартянов А.С., Соломин Е.В. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. //Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" (ISJAEE). 2013. № 1-2 (118). -С. 59-62.
9. Данилевич Я.Б., Богуславский И.З. Асинхронизированные синхронные генераторы для ветростанций и малых ГЭС //Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" (ISJAEE). 2004. № 7. -С. 19-21.
10. Ганджа С.А. Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком. //Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2010. Вып. 14, № 32. -С.64-69.
11. Кручинина И.Ю., Антипов В.Н. Проблемные вопросы создания высокоскоростных минитурбогенераторов и пути их решения. //Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. -С. 25-34.
12. Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Грозов А.Д., Иванова А.В. Закономерности изменения параметров размерного ряда мини-турбогенераторов для малоразмерных газотурбинных установок. //Электричество. 2013. № 12. -С. 51-56.
13. Неофициальный сайт программы ANSOFT Maxwell [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ansoft-maxwell.narod.ru/>.
14. RMXprt. Общая информация [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cae-expert.ru/product/rmxprt>.
15. Леонов С.В., Федянин А.Л., Муравлев О.П. Статическая модель герметичного синхронного двигателя дискового типа с магнитосвязанными полюсами. //Известия ТПУ. Выпуск № 4/том 312 /2008.

REFERENCES

1. Golovanov D.V., Kovarsky M.E., Magin V.V., Trunov I.G. Methods for calculating high-speed generators for gas turbine units // Questions of electromechanics. Proceedings of VNIIEМ. 2012. Vol. 126, No.2, pp. 3-8.(In Russ).
2. Zilberman S.Z. Development and study of contactless DC torque motors: Abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Sverdlovsk, 1978. 14 p. (In Russ).
3. Gandzha S.A., Martyanov A.S. Methodology for accelerated calculation of synchronous generators with axial magnetic flux //International Scientific Journal "Alternative Energy and Ecology" (ISJAEE). 2014. No.5 (145), pp. 42-44. (In Russ).
4. Klyavlin A. New ANSYS Capabilities in Modeling Electromagnetic Fields //CAD and Graphics. 2012. No.3 (185). P. 44-46. (In Russ).
5. Antipov V.N., Danilevich Ya.B. High-Speed Electric Machines for Power Engineering: Status and Development Trends // Electrical Engineering. 2007. No.6, pp.2-5. (In Russ).
6. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Khozikov Yu.F. Low-Power Turbo Generators for Decentralized Power Supply Systems / Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg, 2009. (In Russ).
7. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Khozikov Yu.F. Microturbogenerators of increased power - possibilities and prospects / International scientific journal "Alternative Energy and Ecology" (ISJAEE). 2008. No.1, pp. 149-151. (In Russ).
8. Kindryashov A.N., Martyanov A.S., Solomin E.V. Electric machines of wind power plants with a vertical axis of rotation // International scientific journal "Alternative Energy and Ecology" (ISJAEE). 2013. No.1-2 (118), pp. 59-62. (In Russ).
9. Danilevich Ya.B., Boguslavsky I.Z. Asynchronized synchronous generators for wind farms and small hydroelectric power plants // International scientific journal "Alternative Energy and Ecology"



(ISJAEE). 2004. No. 7. pp. 19-21. (In Russ).

10. Gandzha S.A. Analysis of electromagnetic power for various designs of axial flow valve machines // Bulletin of SUSU. Series "Power Engineering", 2010. Issue 14, No.32, pp. 64-69. (In Russ).

11. Kruchinina I.Yu., Antipov V.N. Problematic issues of creating high-speed mini-turbogenerators and ways to solve them // Information and control systems. 2012. No.4, pp. 25-34. (In Russ).

12. Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. Regularities of changing the parameters of the size range of mini-turbine generators for small-sized gas turbine units // Electricity. 2013. No.12, pp. 51-56. (In Russ).

13. Unofficial site of the ANSOFT Maxwell program [electronic resource]. Access mode: <http://ansoft-maxwell.narod.ru>. (In Russ).

14. RMXprt. General information [electronic resource]. Access mode: <http://cae-expert.ru/product/rmxprt>. (In Russ).

15. Leonov S.V., Fedyanin A.L., Muravlev O.P. Static model of a hermetic synchronous disk-type motor with magnetically coupled poles. TPU News, Issue No. 4/volume 312/2008. (In Russ).