

В. А. Колычев, И. И. Тынъянова, К. А. Миронов // Проблемы машиностроения. – Харьков, 2009. – т. 12. – № 5 С 3-10. 15. Колычев В. А. Моделирование энергетических характеристик гидротурбин на начальном этапе проектирования/ В. А. Колычев, И. И. Тынъянова, К. А. Миронов// Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харьков, 2010. – № 1/6 (43). – С. 27–38. 16. Колычев В. А. Гидродинамические характеристики элементов проточной части и их влияние на энергетические показатели радиально-осевой гидротурбины / В. А. Колычев, И. И. Тынъянова, К. А. Миронов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харьков, 2010. – № 4/7 (46). – С.3 – 15

Надійшла до редакції 14.02.2013

УДК 621.224

Моделирование гидродинамических характеристик лопастных систем радиально-осевой гидротурбины / И. И. Тынъянова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 11 (985). – С. 156-161. – Бібліогр.: 16 назв.

В работе рассмотрены вопросы моделирования гидродинамических характеристик лопастных систем, базирующиеся на совместном использовании модели осредненного закрученного потока и упрощенной модели пространственного потока в безлопастных участках проточного тракта. Рассматривается их влияния на формирование энергетических характеристик радиально-осевой гидротурбины.

Ключевые слова: радиально-осевая гидротурбина, проточная часть, рабочее колесо, гидродинамические характеристики.

Worked out methodology of calculation and analysis of hydrodynamic characteristics of the blade systems, that allows estimating the hydrodynamic internals of the blade system of runners in the process of her profiling. Analytical dependences, which set influence of geometrical and regime parameters of runners on distribution of parameters of stream after a runners, what necessary for an analysis concordances of runners with taking of hydroturbine, are got.

Keywords: Francis turbine, flow space, runner, hydrodynamic characteristics, geometrical and regime parameters.

УДК 621.313

А. А. ДУНЕВ, ассистент, НТУ «ХПІ»

АЛГОРИТМ РАБОТЫ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MAXWELL 3D, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДВИГАТЕЛЕ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ

Проведен анализ алгоритма работы статического модуля программного пакета Maxwell 3D, позволяющего решать задачи визуализации магнитных полей в трехмерных электромеханических объектах, применительно для двигателя с катящимся ротором.

Ключевые слова: двигатель с катящимся ротором, система уравнений Максвелла, сеточная структура, магнитостатический решатель, граничные условия.

Введение

Во всех известных методиках расчета магнитного поля двигателя с катящимся ротором (ДКР) основная часть анализа базируется на аналитическом подходе к решаемой проблеме, что влечет за собой ряд допущений и неточностей, которые отражают свой характер на конечном результате расчета [1], что является недостатком существующих методик. Поэтому для более детального и точного расчета магнитных полей в ДКР было принято решение использовать численный метод расчета, который дает возможность более качественно оценить существующие процессы, в двумерном и трехмерном виде, протекающие в ДКР при работе.

© А. А. ДУНЕВ, 2013

Так же, следует отметить и тот факт, что в последние годы в связи с потребностями фундаментальной науки и ее практических приложений алгоритмы численного решения уравнений Максвелла стали все чаще применяться в областях сложной формы. Эти алгоритмы, основанные на использовании методов конечных объемов или конечных элементов [2], широко применяются на текущий момент в таких прикладных программах как FEMM, Maxwell и ANSYS. Последние два инструмента хорошо справляются с задачами трехмерного моделирования и расчета электромагнитных процессов, протекаемых в ДКР.

Цель работы

Целью работы является анализ работы магнитоэлектростатического решателя программного пакета Maxwell 3D и применение полученных знаний для расчета статического магнитного поля в ДКР.

Материал исследования

В целом магнитное поле, которое представляется на основе законов электромагнетизма, объединенных в единую систему Максвеллом, может быть описано следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J} ; \\ \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 ; \\ \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} ; \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где E - вектор напряженности электрического поля;

B - вектор магнитной индукции;

J – плотность токов проводимости;

ρ – плотность зарядов в области;

ε_0 – электрическая постоянная;

μ_0 – магнитная постоянная, причем константы удовлетворяют соотношению $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$.

Плотности тока и заряда в этих уравнениях считаются заданными функциями координат и времени.

При реализации таких алгоритмов возникает принципиальная трудность, связанная с нарушением дискретного аналога соотношения (1). Это обусловлено тем, что плотности заряда ρ и тока J вычисляются по алгоритмам, не зависящим от уравнений Максвелла и друг от друга.

Для реализации расчета магнитного поля ДКР была выбрана программа Maxwell 3D 11v., обладающая интуитивно понятным интерфейсом, достаточным числом функций и хорошей сходимостью расчета.

Применение прикладных программ типа Maxwell 3D, использующих метод конечных элементов на базе решения системы уравнения Максвелла, представляет сложную трехмерную математическую задачу, решение которой не возможно без применения ЭВМ.

Процесс построения и измельчения расчетной сетки, которая накладывается

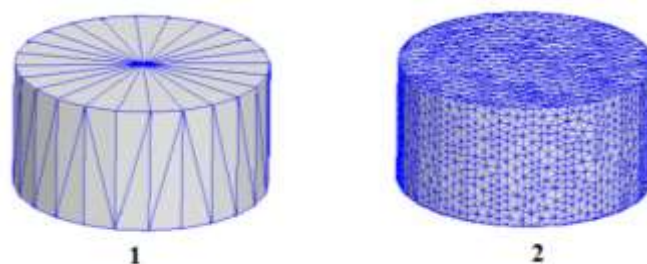


Рис. 1 - Измельчение расчетной сетки для повышения точности расчета

на модель, занимает некоторое время, сходимость расчета для модели 1 происходит быстрее, чем для модели 2 (рис.1). Качество расчета параметров магнитного поля зависит от количества узлов в сетке, соответственно, модель 2 с большим числом ячеек будет иметь результат максимально точно приближенный к действительности [3].

Время, затраченное на расчет такого количества уравнения и качество этого расчета, – это связанные величины, найти «золотую середину» между которыми, достаточно сложная аналитическая.

Для анализа магнитного поля для конкретного промежутка времени был выбран тип задач – «магнитостатика», в котором поле, созданное обмоткой статора, имело статический неподвижный характер, что, в свою очередь, давало возможно очень качественно оценить полученные данные для отдельно взятого промежутка времени работы машины. задача.

В ходе выполнения поставленной задачи магнитостатического процесса был выбран необходимый тип полевого решателя, алгоритм расчета которого приведен ниже (рис.3).

Расчет магнитной индукции и трехмерная картины магнитного поля ДКР в Maxwell 3D сводится к решению магнитостатической полевой задачи [4], магнитное поле в которой создано постоянными магнитами либо постоянными токами, протекающими в катушках.

На практике в полной мере или одновременно решить всю систему уравнений Максвелла оказывается достаточно сложно, а с применением ЭВМ – занимает немало времени. Поэтому для упрощения расчета единое электромагнитное поле от источников тока в конкретных случаях принято представлять в виде частных случаев). Полей, при этом остается та часть процесса и те параметры, которые оказываются влиятельными, т.е. определяют характер, пространственное распределение и величину поля. А маловлияющими факторами пренебрегают.

Поэтому, так как электромагнитные процессы, рассматриваемые при помощи

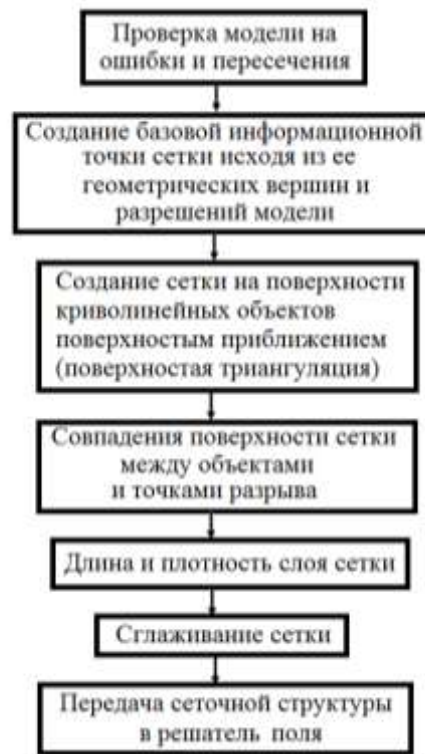


Рис. 2 - Алгоритм создания сеточной структуры для расчета модели в Maxwell 3D



Рис. 3 - Алгоритм статической задачи полевого решателя в Maxwell 3D

Maxwell 3D для ДКР, как и предполагается, имеют статический характер и не меняются во времени, следовательно, потерями на вихревые токи можно пренебречь.

В соответствии с заданными магнитными свойствами материалов ДКР распространение магнитного поля зависит от пространственного распределения магнитной проницаемости.

Решение рассматриваемой полевой задачи определяется следующими двумя уравнениями Максвелла:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J};$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0;$$

кроме того, используется следующая важная зависимость:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} + \mu \cdot \vec{M}_p,$$

где:

$\vec{H}(x, y, z)$ – напряженность магнитного поля;

$\vec{B}(x, y, z)$ – магнитная индукция магнитного поля;

$\vec{J}(x, y, z)$ – плотность тока проводимости;

$M_p(x, y, z)$ – постоянное намагничивание (намагниченность насыщения ферромагнитного материала);

$M(x, y, z)$ – магнитный момент единицы объёма вещества

$$M = \frac{m}{V},$$

где m – вектор магнитного момента, V – объем;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума

μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Для нелинейных материалов зависимость между H и B поля является нелинейной и может быть изотропной или ортотропной (в случае анизотропного поведения μ_r – это тензор). Также в реальных случаях нелинейность может встречаться и учитываться и в постоянных магнитах. Кроме того, если состояние намагниченности рассматривается для (нелинейных) постоянных магнитов, работающих ниже перегиба, Maxwell 3D предусматривает расширенные опции, позволяющие получить решение, основанное на ранее вычисленной рабочей точке намагниченности. Если нелинейность встречается в магнитомягких материалах (с незначительным гистерезисом) одновременно с ортотропным поведением, для Maxwell 3D требуется, чтобы были заданы кривые $B(H)$ по координатам в соответствующих материалах. Из этих кривых зависимость энергии от H берется по каждой из координат и используется в процессе получения нелинейного тензора проницаемости, используемого в итерационном процессе решения Ньютона-Рафсона:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + [\hat{\mu}] \cdot (\vec{H} - \vec{H}_0),$$

$$[\hat{\mu}] = \frac{\partial}{\partial \vec{H}} \vec{B} = [\Delta \hat{\mu}] + [\mu],$$

где: \vec{B}_0 и \vec{H}_0 – предыдущее полевое решение, $[\Delta \hat{\mu}]$ – общий полный тензор, для $[\mu]$ присвоено следующее:

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_x & & \\ & \mu_y & \\ & & \mu_z \end{bmatrix}$$

где μ_x , μ_y , μ_z – учитывают анизотропные эффекты любых слоистостей материала, имеющих в модели.

В целом трехмерный магнитостатический решатель Maxwell 3D (или, так называемый, – «solver») рассматривает магнитное поле \vec{H} со следующими компонентами:

$$\vec{H} = \vec{H}_p + \nabla\phi + \vec{H}_c$$

где ϕ – магнитный скалярный потенциал, \vec{H}_p – частное решение, полученное присвоением всем граням расчетной сетки значений, определяемых законом полного тока для всех контуров всех поверхностей тетраэдров в сетке, и \vec{H}_c – создано постоянными магнитами. Таким образом, переменные расчета – это узловые величины магнитного скалярного потенциала (десять величин в одном четырехграннике - в каждой из четырех вершин и во всех шести серединах узловых ребер), при этом должна обеспечиваться квадратичная аппроксимация внутри каждого конечного элемента (рис. 4).

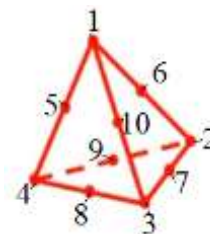


Рис. 4 - Узловые расчетные точки элемента расчетной сетки (тетраэдра)

У этой формулировки есть большие преимущества перед возможными другими, в частности использование значительно меньшего количества вычислительных ресурсов (из-за скалярной сущности переменных).

Магнитостатический решатель обрабатывает линейные и нелинейные трехмерные задачи. В нашем случае для нелинейных задач, в связи с нелинейностью кривой намагничивания $B(H)$, используется классический итерационный алгоритм Ньютона-Рафсона с управляемой пользователем точностью. Типичные граничные условия, используемые в магнитостатических задачах, - это тангенциальность магнитного поля (по умолчанию - естественное граничное условие, которое автоматически применяется ко всем поверхностям области решения, т.е. к поверхностям объекта геометрии, содержащего внутри всю модель). Это граничное условие по умолчанию может быть изменено, если ко внешним поверхностям пространства решения применены другие граничные условия. В нашем случае, для расчета параметров магнитного поля модели ДКР, граничные условия были приняты по умолчанию.

Эти условия ограничивают магнитное поле в пространстве решения, поэтому эта граница расчета должна быть отнесена на некоторое расстояние от источников, чтобы избежать сверхограниченности области при размещении границы близко к объектам модели. Несмотря на то, что трудно найти критерий универсальной обоснованности относительно размещения границ задачи, но, опираясь на хорошее эмпирическое правило, можно сказать, что если модель может быть представлена находящейся внутри сферы радиуса R , то границы могут быть размещены в 4-5 радиусах R от воображаемого центра модели.

В целом алгоритм работы Maxwell 3D 11 v. выглядит следующим образом (рис. 5) [5].

Существует так же граничные условия «Симметрии» («Symmetry»), которые созданы для решения задач с симметрией и позволяют располагать значительно меньшим размером задачи для необходимой точности, но их применением мы заниматься не будем, т.к. расчетная модель ДКР имеет достаточно сложный, эксцентрический характер.



Рис. 5 - Общий алгоритм работы программы для магнитостатического типа задач

Результаты исследований

Анализ магнитостатической методики расчета и применение рассмотренного алгоритма для конкретной задачи расчета магнитных полей в Maxwell 3D, позволяет

создать трехмерную модель двигателя с катящимся ротором, верно задать расчетную сетку, материалы, граничные условия и параметры магнитной системы, что бы в конечном итоге, получить картину распределения магнитного поля с целью ее дальнейшего анализа и улучшения параметров двигателя.

Пример полученного результата численного анализа магнитного поля в Maxwell 3D для шести-пазового ДКР показан на рис.6.

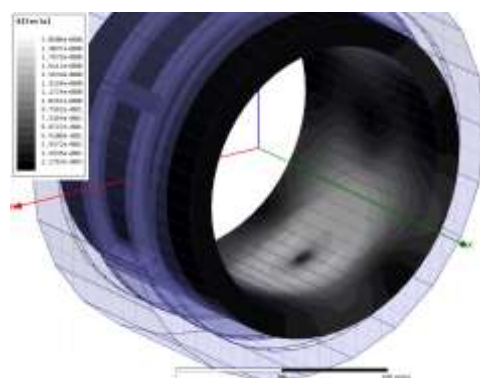


Рис.6 - Визуализация распределения магнитного поля в роторе ДКР, рассчитанного через магнитостатический решатель в Maxwell 3D

Выводы

В ходе проведенных исследований, анализа работы решателя и эффективного его применения для численного расчета и оценки магнитостатического поля в ДКР можно судить о эффективном применении Maxwell 3D для анализа трехмерных полевых задач любой сложности.

Список литературы: 1. Шурина, Э. П. Об алгоритмах решения уравнений максвелла на неструктурированных сетках [Текст] / Шурина Э. П., Великая М. Ю., Федорук М. П. // Институт вычислительных технологий СО РАН Новосибирск. 2000 г. - Том 5, №6.- с. 99-116. 2. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы [Текст] / Р. Галлагер // Издательство «Мир», г. Москва. - 1984 г. 3. Рояк, М. Э. Сеточные методы решения краевых задач математической физики: Учеб.пособие. [Текст] / М.Э. Рояк, Ю.Г. Соловейчик, Э.П. Шурина // Изд-во НГТУ, Новосибирск. - 1998 г. 4. Assous F. On a finite-element method for solving the three-dimensional Maxwell equations [Текст] / Assous F., Degond P., Heitze E., Raviart P.A., Segre J. // J.Comp.Phys. - 1993.. - V. 109. - p. 222–237. 5. Maxwell 3D 11v. User Manual, режим доступа: http://narod.ru/disk/9840402000/Maxwell_3D_v11_full_book.pdf.html.

Надійшла до редколегії 28.02.2013

УДК 621.313

Алгоритм работы программного пакета MAXWELL 3D, применяемого для численного анализа магнитного поля в двигателе с катящимся ротором/ А. А. Дунев// Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 11 (985). – С. 161-167. – Бібліогр.: 5назв.

Проведено аналіз алгоритму роботи статичного модулю програмного пакету Maxwell 3D, що дозволяє вирішувати завдання візуалізації магнітних полів в тривимірних електромеханічних об'єктах, стосовно двигуна з ротором, що котиться.

Ключові слова: двигун з ротором, що котиться, система рівнянь Максвелла, сіточна структура, магністатичний вирішувач, граничні умови.

The analysis of the algorithm of the static module software package Maxwell 3D, which allows to solve problems of visualization of magnetic fields in three-dimensional electromechanical objects in relation to the engine with rolling rotor.

Keywords: motor with the rolling rotor, system of the Maxwell equations, grid structure, magnetostatic solver, boundary conditions.

УДК 537.84

А. Ю. ПЕДЧЕНКО, магістр, НТУУ «КП», Київ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ У ВИСОКОЧАСТОТНОМУ ІНДУКЦІЙНОМУ ПЛАЗМОТРОНІ

Розроблено математичну модель магнітогідродинамічного та теплового стану ВЧІ-плазмотрона для моделювання процесу сфероїдизації кварцових гранул. Досліджено вплив зміни частоти та сили струму, витрат плазموутворюючого газу на поля індукованого поля у плазмі, на розподіл полів температури та швидкості в ВЧІ-плазмотроні без та при врахуванні радіаційної складової теплообміну.

Ключові слова: ВЧІ-плазмотрон, магнітогідродинамічний та тепловий стан, частота, густина електричного струму, температура, швидкість потоку плазми.

Постановка проблеми

Математична постановка задачі, про яку йде мова в статті, належить до фізики нерівноважної плазми.

Первинною задачею при моделюванні різноманітних високочастотних індукційних процесів, що виникають у плазмі є перш за все знаходження параметрів електромагнітного поля, які діють на робоче середовище, а саме – напруженості електричного поля або густини електричного струму, що визначають джоулеву теплоту у плазмі. А вже на базі отриманих даних можна визначити вторинні процеси та їх фізичні поля – тепло-гідродинамічний стан системи.

Аналіз досліджень і публікацій

Проблемі досліджень фізичних процесів, що виникають у ВЧІ-плазмотронах, присвячена велика кількість експериментальних робіт, а теоретичним дослідженням – обмежена кількість наукових робіт. При цьому отримання достовірних експериментальних даних стримується надвисокими температурами плазми (понад 3000 °С), агресивністю середовища, чутливістю газового розряду до оточуючих тіл та ін. В той час як теоретичні методи дослідження не стримується екстремальними властивостями високотемпературної плазми і, тому за допомогою обчислювального експерименту можуть дати вагомий результати в дослідженнях нерівноважної плазми.

Вивченню властивостей безелектродних високочастотних розрядів присвячена робота Штрауса [1]. Автор якої досліджує вплив різних газів на запалення

© А. Ю. ПЕДЧЕНКО, 2013