

А.С.Любимцев, О.Я.Ильина
Производственный кооператив «ТОР»,
г. Санкт-Петербург



Конференция памяти Н.Н. Острякова.
Секция 4 (среда, 13 октября).
ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Расчётное моделирование асинхронного электродвигателя гиromотора средствами конечно-элементного анализа

Расчёт и проектирование гироскопа — это сложная инженерная задача. Но кроме собственно гироскопа встаёт вопрос о приводе гироскопа. Наиболее распространённый привод — это электрическая машина, гиromотор.

К гиromоторам применяются специальные требования по точности изготовления, по уровню вибраций. Существуют проверенные временем инженерные методики расчёта гиromоторов. Но часто в инженерные методики закладываются некоторые экспериментальные данные, которые были проверены для какой-то одной машины или серии машин, а использовать их собираются для другой машины, которая «похожа». Из-за этого возникают погрешности, которые могут стать критичными для такого высокоточного прибора, как гироскоп. При этом не помогут ни точность изготовления, ни дорогие материалы. Если ошибка была заложена при проектировании, от неё уже не избавиться.

Помочь уменьшить эту ошибку можно с помощью компьютерного моделирования и численного расчёта полей (магнитных, электрических, тепловых), возникающих при работе гиromотора гироскопа. В данной работе показано, в какой части можно использовать конечно-элементный пакет моделирования для расчёта гиromотора.

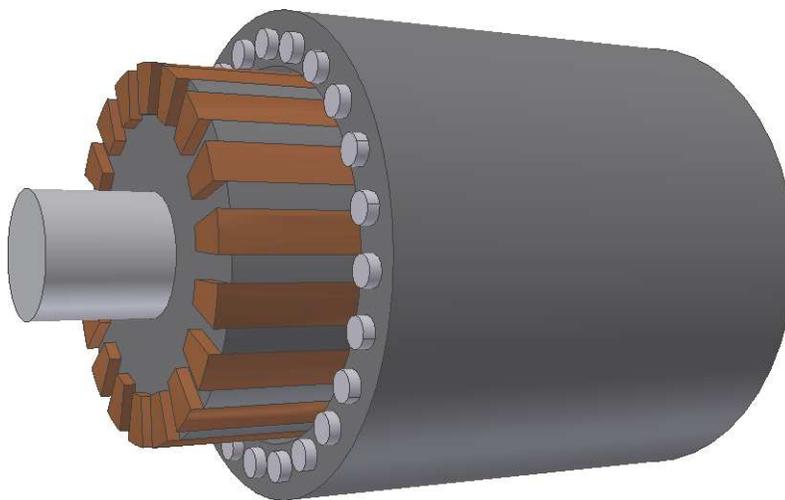


Рис. 1. Гиromотор, внешний вид.

Гиromотор представляет собой двоянный трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Конструктивное исполнение гиromотора — с внешним ротором и внутренним статором. Гиromотор имеет два статора и единый симметричный ротор с залитыми короткозамкнутыми обмотками. Такая конструкция обеспечивает высокий

кинетический момент гироскопа. Симметричный ротор повышает стабильность работы при изменении температуры и вибрациях.

Напряжение питания: 3-фазное, 36 В, 400 гц. Потребляемый ток: 0.5-0.6 А

Число пазов стора: $Z = 18$, число пар полюсов $2p = 2$, число фаз $m = 3$.

Скорость вращения ротора с учётом скольжения: $n = 22000—23000$ об/мин.

Вес гиromотора: 2.2 кг.

Диаметр ротора: $d2 = 80$ мм. Диаметр статора: $d1 = 60$ мм. Осевая длина: $l = 40$ мм.

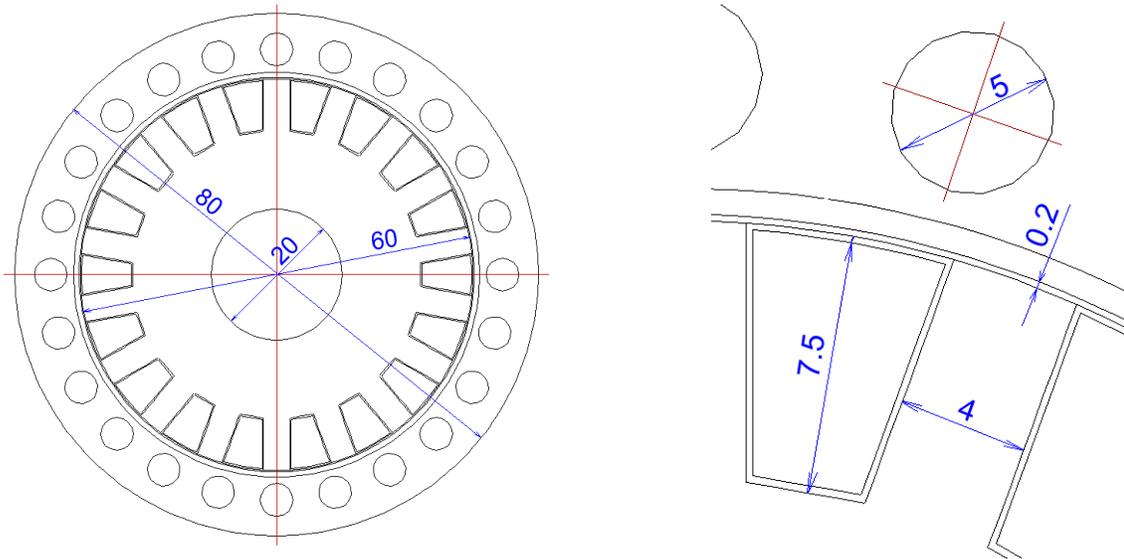


Рис 2. Геометрия гиromотора.

Расчёт гиromотора включает в себя расчёт магнитной цепи, расчёт потерь, тепловой расчёт, механический расчёт.

При постановке магнитной задачи задаются источники поля (токи в обмотках), задаются свойства материалов. Задача может быть сформулирована как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A ($\mathbf{B} = \text{rot } A$, \mathbf{B} - вектор магнитной индукции):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - i\omega g A = -j_{\text{стоп}}$$

При постановке тепловой задачи также задаются источники (тепловыделение), задаются свойства материалов (теплопроводность). При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c\rho \frac{\partial T}{\partial t}$$

Для решения задач в таком виде разработано много численных методов. В данной работе использовалась программа ELCUT, которая реализует метод конечных элементов.

Данная программа может решать магнитные, электрические, тепловые и механические задачи.

У программы есть графический интерфейс, который позволяет задавать данные и смотреть результаты в удобной форме.

Набор для магнитных расчётов	
Магнитные задачи	Магнитное поле переменных синусоидальных токов
	Магнитостатика
	Магнитостатика и нестационарное магнитное поле
Набор для электрических расчётов	
Электрические задачи	Электростатика и электрическое поле постоянных токов
	Электростатика, электрическое поле переменных синусоидальных токов и постоянных токов
	Электростатика, электрическое поле постоянных токов и нестационарных токов
Набор для тепловых и механических расчётов	
Тепловые и механические задачи	Стационарная теплопередача
	Нестационарная и стационарная теплопередача
	Анализ упругих деформаций

Рис 3. Программа ELCUT.

При постановке задачи в программе рисовалась геометрическая модель. Задавались свойства материалов, источники поля и граничные условия.

В модели настраивалась сетка конечных элементов. Автоматический алгоритм построения сетки заложенный в программу выбирает густоту сетки в зависимости от геометрии. Он не учитывает физику. Поэтому сетка вручную была сгущена в области воздушного зазора.

Также стоял вопрос о расположении границы области расчета. Обычно границу располагают далеко от устройства и ставят там условие нулевого поля. В данном случае удалось приблизить границу и уменьшить область расчета, и тем самым сократить время расчета.

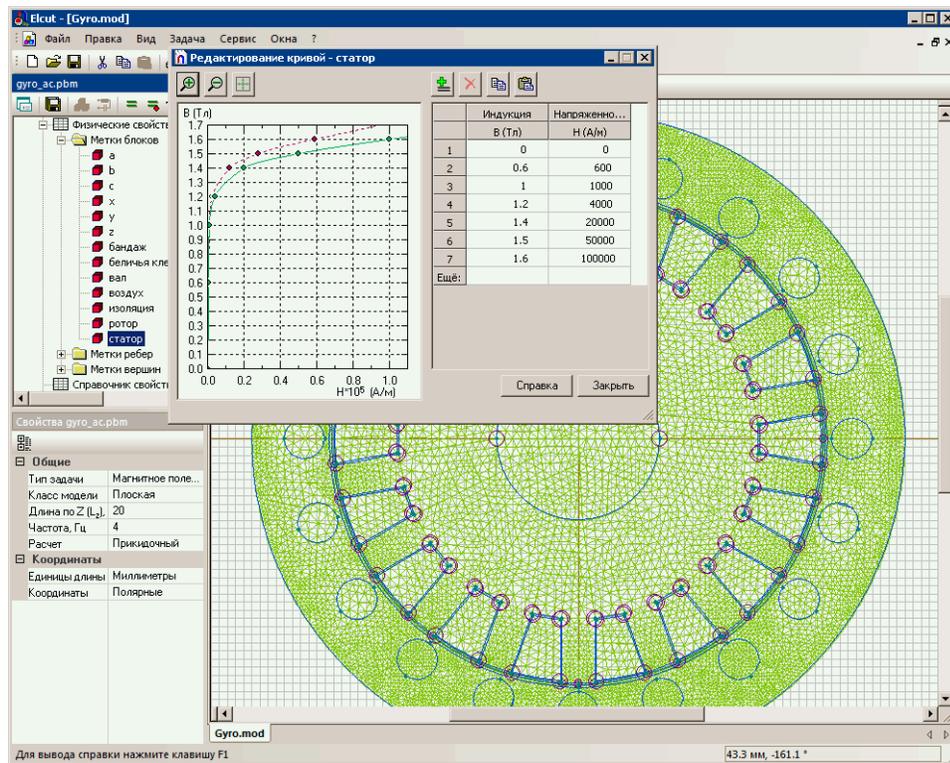


Рис 4. Построение расчётной модели.

Результат численного расчёта представляет собой распределение магнитной индукции в машине. По картине поля были найдены индукции в зубцовой зоне, в спинке статора и в роторе. Были найдены токи в роторе.

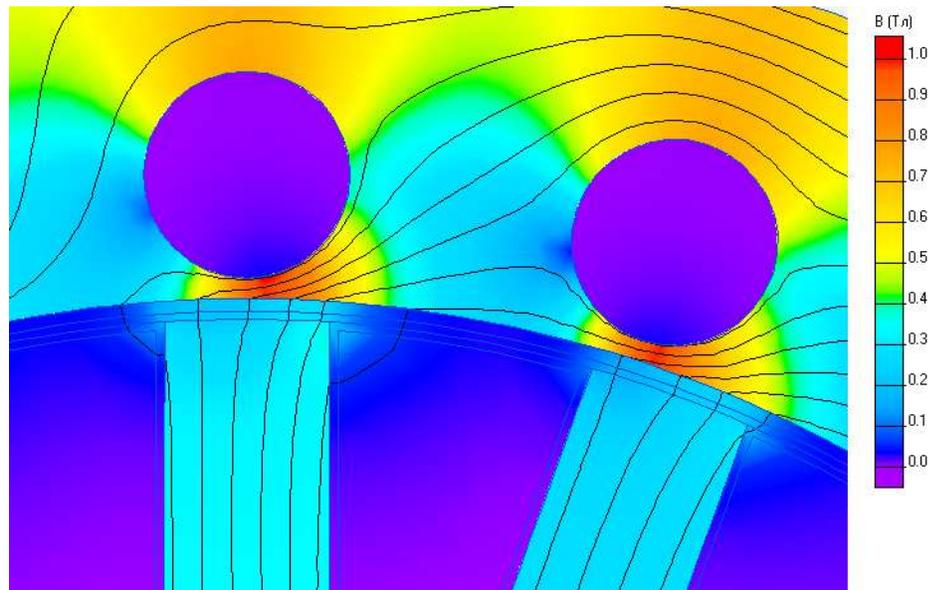


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в зубцовой зоне.

Было проведено моделирование режима холостого хода и короткого замыкания. В этих режимах были посчитаны потоки и индуктивности. По этим данным была составлена схема замещения машины для выполнения динамического расчёта.

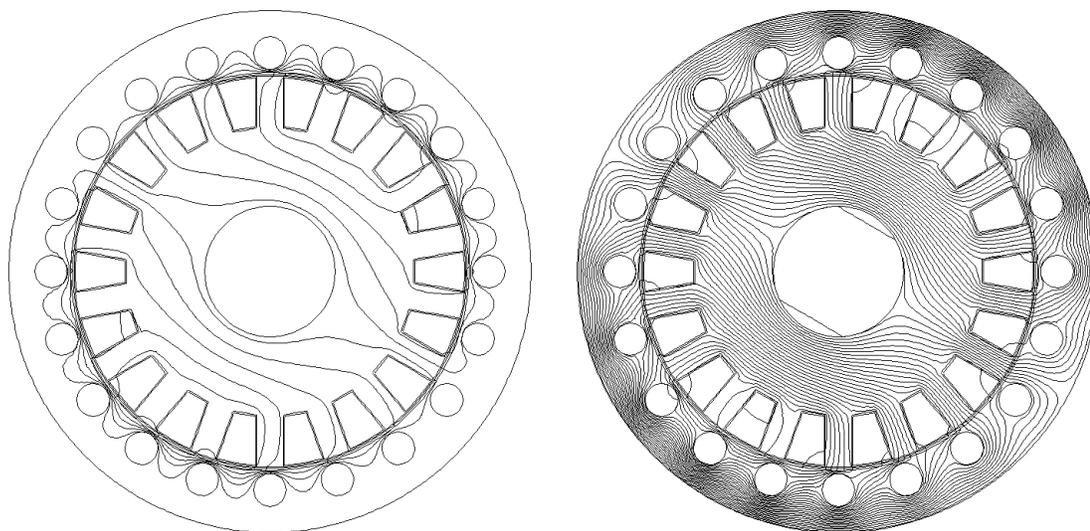


Рис. 6. Поле машины при коротком замыкании (слева) и при холостом ходе (справа).
В статорной обмотке течёт номинальный ток.

Также в магнитной задаче был посчитан момент, действующий на ротор, и получена механическая характеристика (зависимость момента от скольжения).

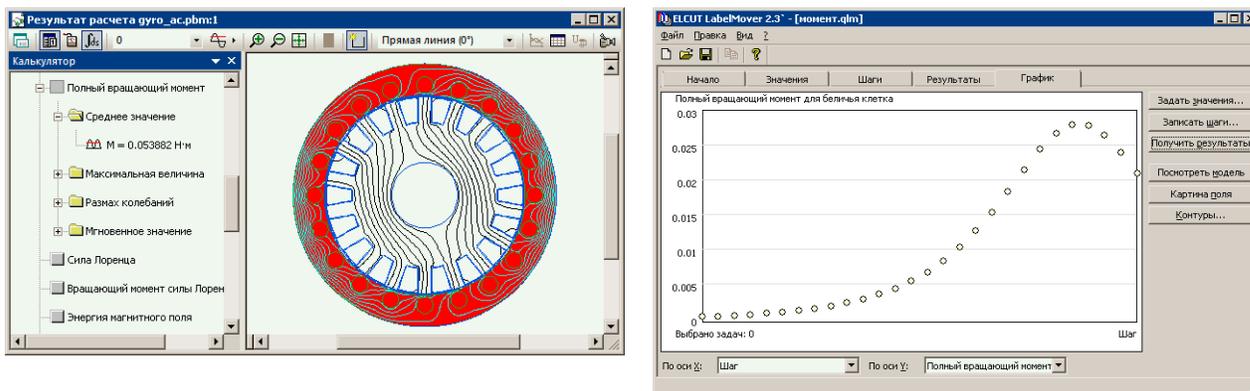


Рис 7. Механическая характеристика, полученная при постоянном токе статора.

Тепловой расчёт производился на основе данных, полученных из магнитной задачи. Были определены электрические потери в роторе. Определены потери на гистерезис.

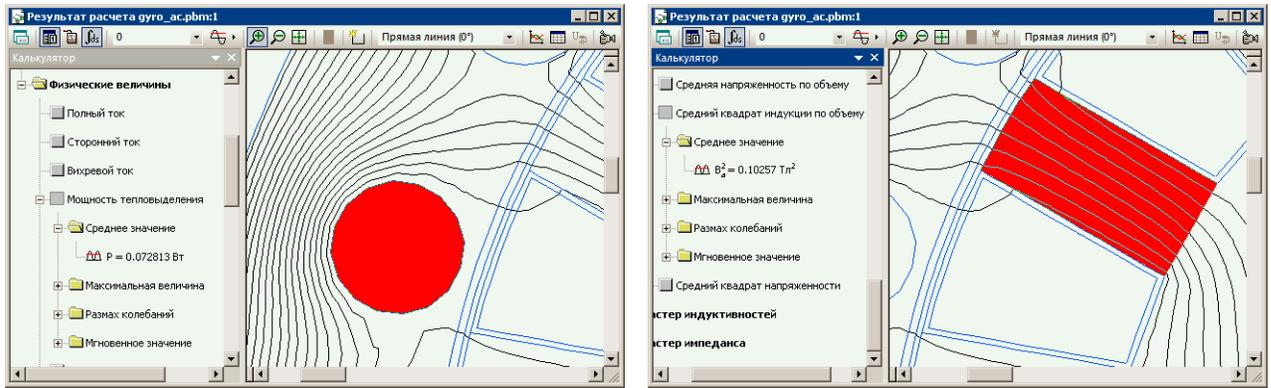


Рис 8. Определение электрических и магнитных потерь ($\sim B^2$).

Результат теплового расчёта — распределение температуры в машине. Были определены превышения температуры в обмотке, в железе.

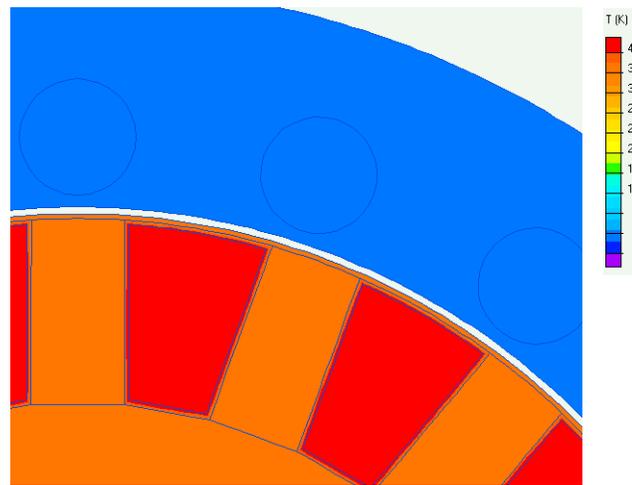


Рис 9. Распределение температуры в зубцовой зоне.

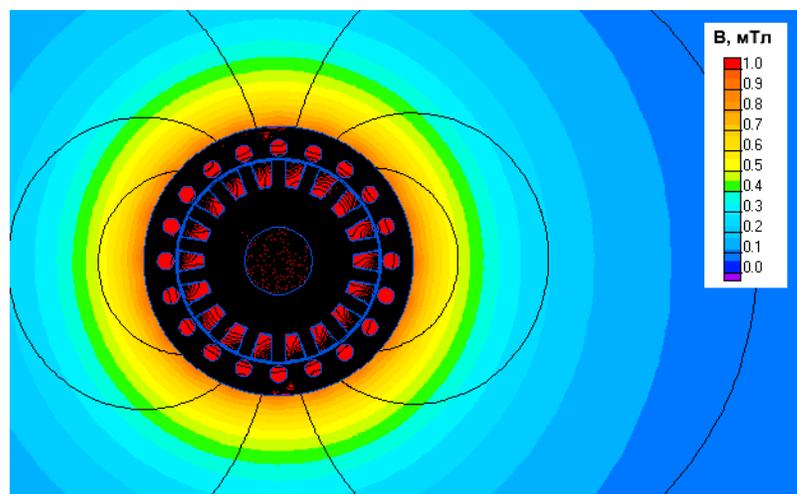


Рис 10. Внешнее магнитное поле.

Кроме этих базовых расчётов были проведены некоторые дополнительные исследования.

Было исследовано внешнее поле гиromотора для целей задачи электромагнитной совместимости. Индукция на расстоянии 10 мм от машины составляет 1 мТл. Такой низкий уровень внешнего поля и дал возможность приблизить внешнюю границу расчёта.

С помощью модуля параметрического моделирования LabelMover комплекса ELCUT исследовано влияние нестабильности размеров воздушного зазора на вращающий момент на роторе.

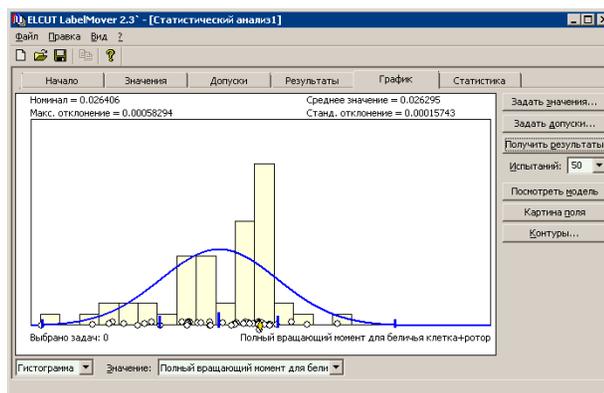


Рис. 11. Статистический анализ.

Как показано в представленной работе и подтверждено многочисленными промышленными применениями, конечно-элементное моделирование - это мощный инструмент ускорения и повышения качества проектирования любых технических устройств, и в частности, гиromоторов. Но часто пользователи, особенно начинающие, забывают, что полученное решение, как бы красиво и убедительно оно ни выглядело, является результатом расчёта, и его точность в первую очередь зависит от исходных данных и расчётной модели. Естественно, сам инструмент должен быть надёжен и удобен. Поэтому мы постоянно добавляем функциональность и исправляем ошибки. Выпускаются новые версии (кстати, буквально через пару недель намечен выпуск ELCUT 5.8), но усовершенствование инструмента никаким образом не снижает требования к квалификации инженера, его применяющего. Более того, так как любая инженерная идея по модификации устройства может быть практически мгновенно проверена расчётом, всё большее значение приобретает умение генерировать такие идеи, инженерная интуиция, умение с одного взгляда оценить картинку на экране монитора или найти узкое место, требующее доработки. То есть грамотный инженер - это основная составляющая технологии компьютерного моделирования.

Пару слов хочу сказать об основных направлениях развития нашего проекта. Идеи развития приходят в основном от наших пользователей. Основным содержанием ближайшей новой версии будет существенное усиление магнитного анализа путём возможности экспорта магнитного состояния, что позволит точно считать дифференциальную индуктивность сложных нелинейных систем с несколькими источниками поля, и поддержка параллельных вычислений для параметрического анализа (серийные расчеты или оптимизация) на современных многоядерных процессорах. Обсуждается несколько вариантов дополнительной функциональности для следующих версий - включая точный расчёт магнитных потерь, дополнение постпроцессоров возможностью показывать произвольные формулы от рассчитываемых величин и т.д.. Но выбор пока не сделан, он будет произведен на основе консультаций с нашими пользователями. И ещё одно направление, которым мы активно

сейчас занимаемся - создание трёхмерной версии пакета. Там ещё очень много работы, и мы пока не готовы назначить срок выпуска трёхмерной версии ELCUT. Но работы успешно ведутся.

Мы подготовили диск с материалами, включающими этот доклад и все конечно-элементные модели, которые были использованы в ходе работы. Их можно подробно посмотреть в находящейся на диске бесплатной Студенческой версии пакета ELCUT. Все желающие могут его получить.

Спасибо за внимание! Ваши вопросы, пожалуйста.