

Развитие концепции математического и расчетного моделирования датчиков положения/скорости

Светлана СЫСОЕВА
S.Sysoeva@mail.ru

В статье представлено углубленное математическое обоснование применения численных методов расчета магнитных полей для инженерного моделирования автомобильных магнитоуправляемых датчиков скорости/положения.

Введение

Автомобильные интегральные магнитоуправляемые датчики — ключевой компонент многих современных и будущих автомобильных систем. Коммерческая доступность недорогих ASIC для широкого класса автомобильных задач с готовым цифровым интерфейсом,

минимальная необходимость в покупных компонентах для электронной и механической части ориентируют многих производителей автоэлектроники на применение именно высокотехнологичных ИС и модулей.

ИС Холла, АМР и ГМР широко применяются в составе датчиков положения дроссельной заслонки, модулей или систем контроля коробки передач или рулевого колеса, АБС и других приборов (рис. 1). Для работы многих устройств помимо корпусных и фиксирующих частей достаточно только одного малого дипольного постоянного магнита диаметром всего 6 мм и высотой в половину от этого размера, и этот магнит связан с подвижной частью. Недорогой альтернативой является также применение внешнего штампованного ротора или магнитной полимерной пленки, допускающей адгезивный монтаж. Включение магнита или использование существующих ферромагнитных частей в составе автомобильных механизмов достаточно органично, магнитоуправляемый принцип действия бесконтактный, не чувствителен к влажности, загрязнениям, темноте, с современными ИС устойчив к электромагнитным помехам и высокой температуре. Теми же преимуществами обладают и индуктивные/магнитоиндуктивные датчики, получившие широкое распространение среди автомобильных устройств, также использующие для формирования сигнала магнитные, ферромагнитные и, кроме того, проводящие цепи. Таким образом, общая для этих типов датчиков инженерная задача — формирование переменных магнитных полей и снятие сигналов.

Ввиду того, что уже существует база знаний, разработка магнитоуправляемого устройства может показаться совсем простым делом. Ведь сконструировать магнитоуправляемый датчик можно, располагая только САД-пакетом, а для индуктивных датчиков однозначно требуется выполнение расчетов различного уровня сложности или схемное моделирование.

Тем не менее часто простоте и лаконичности какой-то из измерительных схем, предложенных сегодня для современных магнитоуправляемых ИС, помимо эвристики, предшествует глубокий анализ многих возможных решений и подходов к решению одной и той же задачи (класса задач). Несомненно, для поиска новых решений базу знаний необходимо и анализировать, и пополнять. Для оптимального решения конкретной инженерной задачи, то есть для разработки датчика для автомобильной системы с конкретными рабочими условиями, также необходимо применять методику математического расчета и моделирования поведения магнитной системы в рабочих условиях. Развитию этой концепции применительно к магнитоуправляемым датчикам и посвящена данная статья.

Применение уравнений Максвелла для расчета магнитных датчиков

Магнитные (магнитоуправляемые) датчики используют переменное (бегущее) магнитное поле. Следовательно, для расчета номинальных значений этого поля (векторных величин индукции B) и допусков можно применить уравнения Максвелла, описывающие соотношения между электрическим полем, магнитным полем, электрическим зарядом и электрическим током [1].

Эти четыре уравнения включают: закон Фарадея, закон Ампера с коррекцией Максвелла, теорему Гаусса, выражение $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$. Они иллюстрируют, как изменяющееся магнитное поле образует электрическое поле, как электрические токи и изменяющиеся электрические поля порождают магнитные поля (закон Ампера с поправкой Максвелла), как электрические заряды порождают электрическое поле, а также показывают отсутствие магнитных монополей.

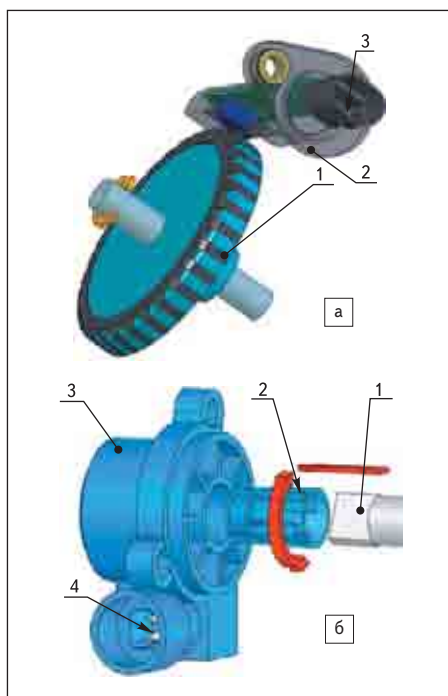


Рис. 1. Примеры автомобильных магнитоуправляемых датчиков:

а) датчик скорости автомобиля:

- 1 — штампованный ротор;
- 2 — бесконтактный датчик;
- 3 — контакты соединителя;

б) датчик положения дроссельной заслонки:

- 1 — вал дроссельной заслонки;
- 2 — ротор датчика;
- 3 — закорпусированные элементы статора (собственно бесконтактный датчик);
- 4 — контакты соединителя

Таблица 1. Уравнения Максвелла

| Уравнения в дифференциальной форме | Уравнения в интегральной форме | Словесная формулировка | Пояснения к обозначениям |
|--|--|---|--|
| $\text{rot } \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t)$ или $\nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t)$ | $\oint_{\partial S} \mathbf{E} \times d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_{B,S}}{dt} =$ $= -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \times d\mathbf{A}$ | Закон электромагнитной индукции Фарадея: изменение вектора магнитной индукции \mathbf{B} во времени порождает вихревое электрическое поле с напряженностью \mathbf{E} | $\oint_{\partial S} \mathbf{E} \times d\mathbf{l}$ — линейный интеграл электрического поля вдоль замкнутого контура поверхности S ; $d\mathbf{l}$ — векторный дифференциал длины пути, тангенциальный контуру; $\Phi_{B,S}$ — плотность магнитного потока через любую (незамкнутую) поверхность S ; $d\mathbf{A}$ — дифференциальный векторный элемент поверхностной области A бесконечно малой амплитуды, с направлением, нормальным S |
| $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \varepsilon_0 (\partial \mathbf{E} / \partial t)$ или $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \varepsilon_0 (\partial \mathbf{E} / \partial t)$ или $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \varepsilon_0 (\partial \mathbf{E} / \partial t) = \mathbf{j} + (\partial \mathbf{D} / \partial t)$ | $\oint_{\partial S} \mathbf{B} \times d\mathbf{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_{E,S}}{dt} =$ $= \mu_0 I_S + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \times d\mathbf{A} =$ $= \mu_0 \int_S \mathbf{j} \times d\mathbf{A} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{E} \times d\mathbf{A}$ | Закон Ампера с поправкой Максвелла: электрический ток плотностью \mathbf{j} и изменение электрической индукции (электрического смещения \mathbf{D}) во времени порождают вихревое магнитное поле с индукцией \mathbf{B} / напряженностью \mathbf{H} | $\Phi_{E,S}$ — плотность электрического потока через любую (незамкнутую) поверхность S ; I_S — интегральный ток, передающийся через любую поверхность S |
| $\text{div } \mathbf{E} = \rho / \varepsilon_0$ или $\nabla \mathbf{D} = \rho$ | $\oint_S \mathbf{E} \times d\mathbf{A} = \frac{Q_S}{\varepsilon_0}$ $\oint_S \mathbf{D} \times d\mathbf{S} = Q_S$ | Теорема Гаусса: электрический заряд является источником электрической индукции \mathbf{D} / поля с напряженностью \mathbf{E} | ρ — плотность электрического заряда; Q_S — несбалансированный электрический заряд, окруженный гауссовой поверхностью S |
| $\text{div } \mathbf{B} = 0$ или $\nabla \mathbf{B} = 0$ | $\oint_S \mathbf{B} \times d\mathbf{A} = 0$ | Теорема Гаусса для магнитного поля, означающая, что магнитное поле не имеет монополей, не расходится, поток магнитного поля через любую замкнутую поверхность S является нулевым | |

Уравнения Максвелла имеют несколько форм записей — в дифференциальной или в интегральной форме (табл. 1).

Поскольку расчет магнитных/магнитоуправляемых датчиков предполагает расчет именно магнитных полей, используются три уравнения (кроме теоремы Гаусса).

Заключительная часть в таблице 1 показывает, что магнитное поле с индукцией \mathbf{B} является вихревым, то есть нет ни источников, ни стоков для линий магнитной индукции и напряженности. Дивергенция $\text{div } \mathbf{B} = 0$ или $\text{div } \mathbf{H} = 0$. Дивергенция — это скалярный дифференциальный оператор векторного поля, показывающий, насколько поле расходится из данной точки. Знак в правой части выражения для дивергенции указывает, является ли данная точка источником или стоком поля. При $\text{div } \mathbf{B} > 0$ точка является источником поля, а нулевая дивергенция — это то же самое, что отсутствие магнитных монополей (теорема Гаусса для магнитного поля). Это же выражение может быть переписано как умножение дифференциального векторного оператора набла на вектор магнитной индукции $\nabla \mathbf{B} = 0$, где оператор набла для трехмерных декартовых координат определяется выражением суммы частных производных базисных векторов:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

и приобретает смысл только с функцией, к которой он применяется.

Для определения вихревой части векторного поля в рассмотрение вводится ротор. В векторном анализе ротор — это векторный оператор, который показывает направление и скорость вращения векторного поля. Через дифференциальный векторный оператор набла выражение, например, закона Фарадея записывается как

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t),$$

где \mathbf{E} — исследуемое поле. Оно считается потенциальным, если ротор в каждой его точке равен нулю, причем векторное поле представляется как градиент скалярной функции (потенциала). Например, таково электрическое поле. Магнитное поле — соленоидальное, так как нулю равна его дивергенция.

Разнообразие форм записей уравнений Максвелла и расчетных моделей обусловлено и тем, что векторы \mathbf{D} и \mathbf{E} , \mathbf{B} и \mathbf{H} связаны между собой посредством, в самом общем виде, тензоров (объектов типа многомерных массивов) или, упростим, скаляров диэлектрической ε (относительной электрической ε_r) и магнитной μ (относительной магнитной μ_r) проницаемостей:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H},$$

где $\varepsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума соответственно.

Материалы линейны, если между векторами \mathbf{D} и \mathbf{E} , \mathbf{B} и \mathbf{H} , а также для векторов поля-

ризации \mathbf{P} и намагнитченности \mathbf{M} действительны соотношения (во многих источниках \mathbf{M} соответствует магнитной поляризации):

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= c_e \varepsilon_0 \mathbf{E}, \\ \mathbf{M} &= c_m / \mu_0 \mathbf{H}, \end{aligned}$$

где c_e — коэффициент поляризации материала, c_m — его магнитная восприимчивость.

Приведенные зависимости позволяют ввести в уравнения Максвелла векторы намагнитченности и поляризации. Для большинства современных магнитных материалов кривые $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ практически линейны. Если рабочие точки магнитов локализованы в линейных областях, эти точки могут перемещаться вверх и вниз при изменении внешнего поля \mathbf{H} без ухода с кривой. Поведение магнита тогда является обратимым.

Если же ε и μ зависят не только от свойств среды, но и от внешнего поля, материалы будут считаться нелинейными (сегнетоэлектрики и ферромагнетики, магниты Алнико).

В бездисперсной, изотропной среде ε и μ представляют собой скалярные величины, в однородной или гомогенной среде ε и μ являются константами. Для многих задач временной и частотной зависимостью этих констант можно пренебречь, хотя реальные материалы характеризуются дисперсией ε и μ в зависимости от частоты. В более общем случае, для анизотропных материалов, ε и μ могут быть представлены тензорами второй валентности в виде матриц (3×3).

Для бездисперсной изотропной среды уравнения Максвелла запишутся как

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu (\partial \mathbf{H} / \partial t), \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \varepsilon (\partial \mathbf{E} / \partial t), \\ \nabla \mu \mathbf{H} &= 0, \\ \nabla \varepsilon \mathbf{E} &= \rho. \end{aligned}$$

Для задач магнитостатики магнитное поле считается неизменным во времени и действительны соотношения:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \nabla \mathbf{B} = 0. \quad (2)$$

Но для расчета магнитных полей уравнений Максвелла оказывается недостаточно, поэтому вводится векторный потенциал (вектор-потенциал) \mathbf{A} . В векторном анализе векторный потенциал — это векторное поле, ротор которого равен искомому векторному полю.

Циркуляция \mathbf{B} , то есть линейный интеграл в векторном поле по контуру замкнутой линии L , определяется по ротору \mathbf{A} :

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (3)$$

Связь потенциалов и полей не является взаимно однозначной, поэтому векторный потенциал \mathbf{A} следует рассматривать как вспо-

могательную величину, не допускающую прямых измерений, но облегчающую расчет электромагнитных полей.

Для задач магнитостатики (2) магнитный векторный потенциал \mathbf{A} будет определяться дифференциальным уравнением:

$$\nabla \times (1/\mu) \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{j}, \quad (4)$$

где μ — магнитная проницаемость, \mathbf{j} — известная плотность тока источника. Если проницаемость линейная (см. (1)), выражение (4) может быть упрощено до

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mu \mathbf{j}$$

или

$$-(1/\mu) \nabla^2 \times \mathbf{A} = \mathbf{j},$$

но выражение позволяет рассчитывать и нелинейные материалы.

Оператор представляет собой «вихрь-вихрь», \mathbf{A} — искомый вектор, $\mu \mathbf{j}$ — исходную функцию.

На практике \mathbf{A} можно вычислить с высокой точностью, но реальные автомобильные задачи выходят за границы магнитостатики, так как магнитные поля датчиков переменные, и, следовательно, будут наводиться вихревые электрические поля и токи.

Применение потенциала позволяет также дать дополнительное выражение для вектора напряженности электрического поля:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - (\partial \mathbf{A} / \partial t),$$

где φ — скалярный потенциал электрического поля, во всех точках поля равный градиенту (производной в направлении наискорейшего спуска) векторного поля.

Для вакуума, в котором нет зарядов и токов и который представляет собой линейную, однородную, изотропную, бездисперсионную среду, уравнения Максвелла запишутся как

$$\begin{aligned} \text{div} \mathbf{E} &= 0, \\ \text{div} \mathbf{B} &= 0, \\ \text{rot} \mathbf{E} &= -(\partial \mathbf{B} / \partial t), \\ \text{rot} \mathbf{B} &= (1/c^2)(\partial \mathbf{E} / \partial t), \end{aligned}$$

где $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ — скорость света.

Их решением являются плоские синусоидальные волны с ортогональными направлениями колебания электрических и магнитных полей.

Рассмотренные выше теоретические принципы положены в основу численных методов расчета магнитных полей датчиков.

Математическое описание методов расчета магнитных полей основывается на том, что любая полевая задача может быть выражена в форме:

$$L \varphi = g, \quad (5)$$

где φ представляет собой искомое решение, L — это оператор, g — исходная функция.

Сравнение численных методов расчета магнитных полей

Существует два фундаментально различных подхода для расчета магнитных полей, в том числе и полей магнитных датчиков [2–3]. Оба включают решение уравнений Максвелла, но с выбором формы решения — в дифференциальной или интегральной форме.

Для решения уравнений Максвелла в дифференциальной форме можно применять два метода: во-первых, метод конечных разностей (МКР, или FDM — Finite Difference Method) и, во-вторых, метод конечных элементов (МКЭ, или FEM — Finite Element Method), из которых, вследствие фундаментальных ограничений метода конечных разностей, на практике применяют именно метод конечных элементов (МКЭ/FEM).

Второй подход к решению уравнений Максвелла — в интегральной форме — использует либо метод граничных элементов (МГЭ, или BEM — Boundary Element Method), либо метод интегральных уравнений или метод конечных объемов (IEM — Integral Equation Method или Volume Integral Method). Метод МГЭ/ВЕМ чаще применяют на практике.

Наиболее распространенным методом расчета магнитных полей является МКЭ на основе решения уравнений Максвелла в дифференциальной форме. Реже применяется метод граничных элементов, ассоциирующийся с решением уравнений Максвелла в интегральной форме.

Преимущества и недостатки методов МКЭ и МГЭ зависят от геометрии, свойств материалов, а также от требуемой точности. Выгодно комбинировать решающие устройства как дифференциальных, так и интегральных уравнений, то есть применять гибридные методы, представляющие собой, с вычислительной точки зрения, оптимальное, точнее, универсальное решение [2–3].

Сравнение методов FEM/ВЕМ (МКЭ/МГЭ)

Метод конечных элементов

Суть метода конечных элементов ясна из рис. 2. Домен задачи или двумерная область бесконтактного взаимодействия магнитного ротора и сенсорного элемента разбивается на малые треугольные 2D-элементы, и задача трансформируется в набор задач, решаемых относительно просто. Каждый из треугольников на рис. 1 представляет собой конечный элемент — треугольник или тетраэдр в 3D-пространстве, с гранями, аппроксимируемыми обычной линейной или квадратичной функцией, точки соединения конечных элементов представляют собой узлы.

В пределах конечного элемента назначают свойства участка объекта, который им ограничен, (магнитные свойства материала).

2D-решение вначале вычисляется для узлов, а затем аппроксимируется интерполяци-

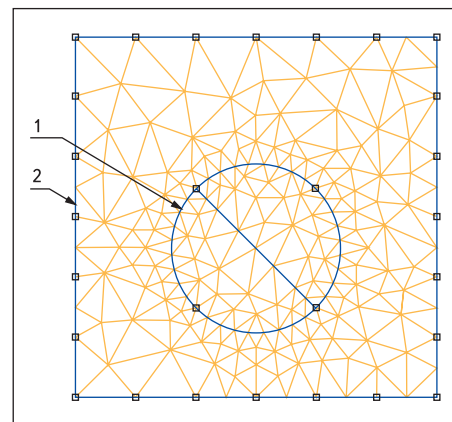


Рис. 2. Иллюстрация метода конечных элементов на примере 2D-дискретизации плоскости дипольного магнитного ротора в пакете FEMM 4.2:
1 — дипольный магнитный ротор в 2D-плоскости;
2 — ограничивающий контур

ей значений потенциала в трех смежных узлах. Вводятся интерполирующие функции, посредством которых значения поля можно вычислить в любой точке внутри элемента или на его границе.

Для метода МКЭ применительно к расчету магнитных полей в (5) L — дифференциальный оператор, φ — решение в виде магнитного векторного потенциала. Для расчета магнитных систем исходными данными g являются плотность тока, распределение остаточной намагниченности, параметры $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ кривых, магнитные проницаемости магнитотвердых и магнитомягких материалов.

Для всех практических, даже магнитостатических задач \mathbf{A} посредством МКЭ вычислить точно невозможно.

Для получения аппроксимирующего магнитостатического решения в виде набора интерполяционных функций используется метод Галеркина. Согласно этому методу строится линейная система уравнений с набором узловых базисных функций:

$$\langle L \varphi, \underline{\alpha} \rangle = \langle g, \underline{\alpha} \rangle.$$

Аппроксимация для \mathbf{A} запишется как:

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^N \mathbf{A}_i \times \underline{\alpha}_i,$$

где \mathbf{A}_i — значения магнитного векторного потенциала на каждом из узлов, $\underline{\alpha}_i$ — узловые скалярные базисные функции. Для векторного потенциала в 3D-пространстве будут три значения \mathbf{A}_i для каждого узла, соответствующие каждому из трех декартовых направлений, в 2D-пространстве одно значение для каждой узловой точки является неизвестным или принимается нулевым.

Кроме того, с МКЭ реальная система не будет смоделирована точно и полностью, так как реальное магнитное поле не заканчивается вместе с сеткой конечных элементов,

накладываемой на домен рабочей области датчика в пределах некоторого искусственно задаваемого контура. В процессе моделирования важно решить, насколько большим должен быть ограничивающий контур и каковы должны быть граничные условия на контуре. Простейший метод задания границ 2D-контура или контурной поверхности — установить условием контура нулевой потенциал (условие Дирихле).

Решение магнитного поля датчика как расчет магнитного векторного потенциала \mathbf{A} само по себе малоинтересно. Для вычисления плотности магнитного потока \mathbf{B} векторный потенциал \mathbf{A} дифференцируется:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}.$$

В процессе дискретизации используются десятки тысяч неизвестных, но специальные алгоритмы и уровень современной вычислительной техники и программных пакетов позволяют быстро получать решение.

Метод граничных элементов

Метод граничных элементов ассоциируется с решением уравнений Максвелла в интегральной форме.

В общем соотношении (5) применительно к МГЭ L — интегральный оператор, φ — решение в виде векторного или скалярного источника.

Согласно математическому описанию метода [2–3, 5–6], магнитный векторный потенциал будет определяться уравнением:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{K}(\mathbf{r}') ds' + \int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dv',$$

где $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ — функция Грина, допускающая наглядное истолкование как результат воздействия сосредоточенного в точке магнитного источника (физически $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ представляет собой эффект, наблюдаемый в точке \mathbf{r} от единичного источника в точке \mathbf{r}'), $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ — известный объемный источник, $\mathbf{K}(\mathbf{r}')$ — неизвестный поверхностный источник или эквивалентная плотность тока на контуре.

Функции Грина находятся как

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \ln(k/|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|) \text{ для 2D-пространства}$$

и

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = 1/|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| \text{ для 3D-пространства,}$$

где \mathbf{r} — это положение, в котором $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ вычислено, \mathbf{r}' — положение источников (исходных условий). Переписывая выражение, можно исходные условия перенести в правую часть уравнения

$$\int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{K}(\mathbf{r}') ds' = \mathbf{A}(\mathbf{r}) - \int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dv',$$

где $\mathbf{K}(\mathbf{r})$ — искомое решение.

Физическое значение этого уравнения в двумерной модели означает, что с МГЭ не-

Таблица 2. Сравнение методов МКЭ и МГЭ

| Метод | Преимущества | Недостатки |
|-------|--|--|
| МКЭ | Универсальность, применимость ко всем типам задач, домены могут не выделяться оператором, не требуются различные функции Грина для выделенных доменов задачи | Концепция «действия на расстоянии» применяется только к эквивалентным источникам. Силы и крутящие моменты не могут быть вычислены |
| | Метод подходит для обработки нелинейных задач всех типов. Нелинейные области должны быть дискретизированы и для дифференциальных, и интегральных уравнений. Можно применять эффективные нелинейные методы в конечно-элементной системе уравнений | Дифференцирование решения для получения численных значений поля \mathbf{B} по ротору \mathbf{A} дает артефакты. Графики \mathbf{A} будут гладкими, но \mathbf{B} будет с прерываниями |
| | Ограничивается только технической возможностью генерации сетки | Интегральные уравнения для обычных кривых поверхностей сложны |
| | С однажды полученным на узлах решением можно вычислять поле в любой точке в пределах сетки посредством интерполяции | При реализации используется большее количество данных в сравнении с объемами данных МГЭ. (Осуществление метода находится в большей зависимости от аппаратных и программных средств) |
| МГЭ | Для задач, в которых используется поверхность, которая больше объема, окруженного ею, время решения может быть даже меньше, чем с МГЭ | Метод может быть неэффективным, если применяется повсеместно для задач, в которых объем доменов велик относительно поверхностной области |
| | Позволяет достигать очень высокой точности расчета полей за счет интегрирования решений | Применяется не ко всем типам полей. Задача может разбиваться на различные домены, разные функции Грина могут потребоваться для каждого домена задачи |
| | Искусственное усечение и применение граничных условий к искусственному контуру не применяются | Метод не может эффективно обрабатывать нелинейные задачи. Для слабонелинейных задач метод дает удовлетворительные результаты, но для задач с нелинейными материалами время решения является значительным |
| | Для линейных задач неизвестные локализованы только на контурах, что позволяет экономить время на генерации сетки и требования к емкости памяти | Для некоторых классов задач может потребоваться большее время постобработки решения |

обходимо дискретизировать только контуры магнитных материалов, а не весь рабочий домен датчика.

Область экстерьерера не усекается искусственно, и метод, в отличие от МКЭ, не использует сетку. Теоретически поле может быть рассчитано до бесконечности.

В 2D-пространстве вместо объемного можно вычислить поверхностный интеграл с известным $\mathbf{Jz}(\mathbf{r}')$, который является частью исходных условий:

$$\int_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{Jz}(\mathbf{r}') ds'.$$

Для вычисления оператора вместо поверхностного можно определить линейный интеграл:

$$\oint_C G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{Kz}(\mathbf{r}') dl'.$$

Для того чтобы найти $\mathbf{K}(\mathbf{r}')$, можно использовать метод Галеркина.

Для МГЭ это усиливает непрерывность \mathbf{H} через контур:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K}.$$

Далее, когда $\mathbf{K}(\mathbf{r}')$ известен, но магнитный потенциал и магнитная индукция неизвестны, плотность потока магнитного поля вычисляется интегрированием неизвестных с ротором по функции Грина:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \int_S \nabla \times G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{K}(\mathbf{r}') ds' + \int_V \nabla \times G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dv'.$$

Согласно этому уравнению обеспечивается непрерывность нормального поля \mathbf{B} .

С МГЭ контуры магнитных материалов, свойства которых изменяются, делятся на граничные элементы; области, содержащие объ-

емные источники, такие как токи, делятся на малые подобласти. Элементам на границах назначаются эквивалентные токи.

Метод МГЭ дает правильные результаты, если используемые материалы рассчитываются линейно. Для нелинейных материалов могут потребоваться дополнительные неизвестные в объеме (главный недостаток метода МГЭ) и дополнительная сетка для расчетов.

Сравнение МКЭ/МГЭ и идея гибридного метода

Существуют задачи, идеально подходящие только для применения МКЭ или только для МГЭ. Наиболее общая стратегия предполагает использование МГЭ для линейных областей и МКЭ для нелинейных задач (но в линейных областях использование МКЭ также допустимо, причем в некоторых из них — желательно). Сравнение методов приведено в таблице 2 [2–3].

Если же задача включает и линейно решаемые области, и нелинейные материалы, можно использовать оба метода.

На комбинировании МГЭ и МКЭ основана идея гибридного метода, согласно которому при решении конкретной задачи выбираются преимущества каждого из методов с одним решающим устройством [2–3, 6].

Идея, несомненно, выигрышная, но осуществить гибридный метод сложно. Необходимо также принять решение, какой метод использовать в каждом объемном домене или двумерной области задачи как основополагающий. Наиболее общая стратегия предполагает использование граничных элементов во всех линейных областях и конечных элементов во всех нелинейных областях (но в линейных областях использование МКЭ также допустимо, причем в некоторых из них — желательно). Если поверхностная область объема больше объема, который она охватывает, и средняя точность решения является достаточной, МКЭ — наиболее предпочти-

тельный метод). То есть, согласно стратегии гибридного подхода, для расчета домена датчика ферромагнитного зубчатого ротора для ферромагнитных материалов можно рекомендовать МКЭ; оставшаяся часть задачи с постоянным обратномещающим магнитом может быть решена МГЭ. Но это только одна возможная гибридная модель.

Вторая основная гибридная модель предполагает выбор МКЭ для всей задачи, что исключает при дискретизации область экстерьера за пределами контура границ задачи, то есть для расчета всего экстерьера относительно магнита применяется МГЭ.

Преимуществом обеих гибридных моделей является то, что область экстерьера не ускается искусственно. Если требуется очень высокая точность в пространстве экстерьера, выбирается первая модель. Если же важнейший аспект расчетов — скорость, рекомендуется вторая гибридная модель. Практические задачи, основные из которых рассматриваются далее, допускают разнообразие для применения методов в пределах выбранной основной модели.

Классификация и анализ основных автомобильных задач

Перед тем как приступить к практическому решению задач расчета и оптимизации магнитоуправляемых/магнитных датчиков, выполним анализ, определив, какой из методов лучше подходит для той или иной задачи.

В основу классификации основных современных автомобильных задач, успешно решаемых посредством магнитоуправляемых датчиков, может быть положено деление по способу формирования и оценки магнитного сигнала в соответствии с рис. 3 на:

- обычные цифровые или аналоговые датчики — один элемент Холла, один синусный или косинусный сигнал;
- дифференциальные импульсные одноосевые датчики скорости — два элемента Холла, смещенных на половину магнитного периода и дающих два первичных синусных сигнала в противофазе и результирующий одноосевой дифференциальный сигнал скорости;
- одноосевые энкодеры — два элемента Холла, смещенных на четверть магнитного периода, дающих два первичных (синусный и косинусный) квадратурных сигнала скорости с функцией направления;
- дифференциально-энкодерные двух- или одноосевые датчики — четыре элемента Холла, смещенных на половину магнитного периода попарно и на четверть друг относительно друга.

Очевидно, что цифровой датчик скорости одного и того же, например дипольного, ротора потребует меньшей точности расчета магнитной системы, чем аналоговый или энкодер, но повышение магнитного (или механического) разрешения ротора и включение

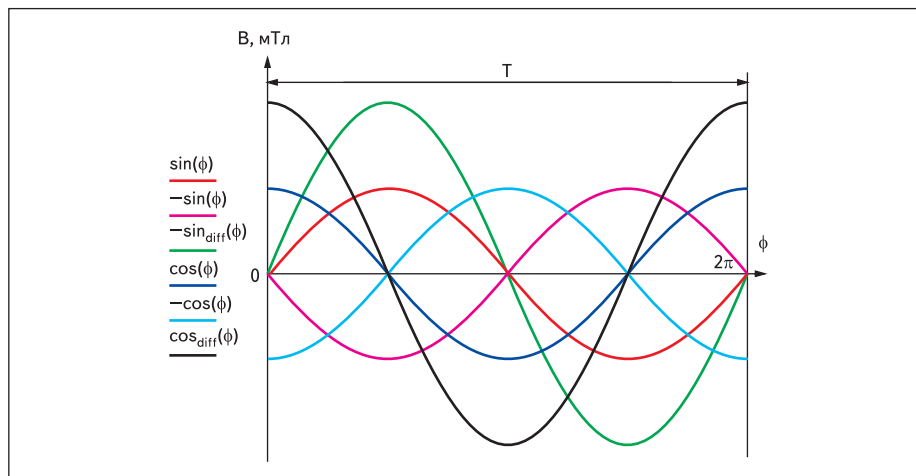


Рис. 3. Сравнение основных типов магнитных сигналов магнитоуправляемых датчиков (Холла)

элементов таймирования (сигнал положения определяется по пропуску кодового элемента и импульса) будет повышать требования точности решения и для этих задач. Типичные автомобильные задачи эффекта Холла, приблизительно в порядке возрастания сложности и повышения точности расчетов, представлены на рис. 4.

Для датчика абсолютного углового положения с интегрированным крестообразным массивом элементов Холла и цилиндрическим дипольным магнитом, размещенным на торце вала и вращающимся параллельно поверхности ИС, без ИМК можно рекомендовать МГЭ, так как магнит представляет собой объект из линейно рассчитываемого материала, есть протяженное свободное пространство, требуется высокая точность расчетов. Без ИМК магнитостатическую задачу синтеза работоспособной магнитной системы можно решить в двумерной области, включающей ось с зазором d по этой оси, или в попарно ортогональных плоскостях, удовлетворяющих этому же условию. В связи с дифференциальной схемой снятия строчковых синусных и косинусных сигналов и применения функции арктангенса оценка качества магнитной поверхности для магнитостатических расчетов датчика не требуется, но комплексная задача оптимизации датчика необходимо решать в 3D-пространстве.

Выбор МГЭ для магнитных роторов обусловлен тем, что значения магнитной плотности (менее чем 10 ppm) могут быть достигнуты с малым числом элементов (~20) [2–3]. Альтернативно потребовались бы тысячи конечных элементов, причем решение могло включать относительно грубые значения полей. Меньшая вычислительная мощность метода МГЭ дает при решении автомобильных задач измерения положения то преимущество, что для каждого нового положения цели относительно датчика может быть использована та же самая дискретизация.

Датчики многополюсного магнитного ротора с кольцевыми магнитными кодовыми

элементами (защелкивающий/дифференциальный/энкодерный датчики, линейный дифференциальный синусно-косинусный датчик) без ИМК также можно рассчитать посредством метода МГЭ, требуемая точность при этом, в зависимости от задачи, варьируется.

Если же датчики магнитных роторов снабжены ИМК или внешними магнитными концентраторами, или модель учитывает другие магнитоконцентрирующие ферромагнитные включения (например, схема с дипольным или многополюсным кольцевым магнитом, магнитное поле которого при вращении параллельно поверхности ИС с ИМК), тогда это пример применения для гибридного подхода, в котором МГЭ выбирается как определяющий метод.

Задача расчета магнитной системы дифференциального датчика скорости ферромагнитного зубчатого ротора, взаимодействующего с аксиальным магниточувствительным элементом, включающим в качестве источника поля магнит обратного смещения, подходит для МКЭ, так как решение в пространстве экстерьера совершенно не важно, многие части системы — ротор и, возможно, магнитопровод — включают нелинейные ферромагнитные материалы. И для создания работоспособного датчика, и для получения оптимизированного решения достаточно расчета магнитной системы в 2D-XY-области.

В объеме анализ этой же магнитной системы, то есть расчет 3D-пространства с учетом расстояния Z, мало влияет на решение [7]. Для создания работоспособного датчика скорости не требуется очень точных вычислений полей, причем аксиальное поле магнита в отсутствие зуба ротора достаточно легко рассчитать аналитически, не только численно. Расчет поля постоянного магнита в воздушном зазоре может быть и приложением для МГЭ. Причем для оптимизации датчика, работающего в условиях вибраций, радиального эксцентриситета и радиальных биений, изменяющих воздушный зазор, необходимы

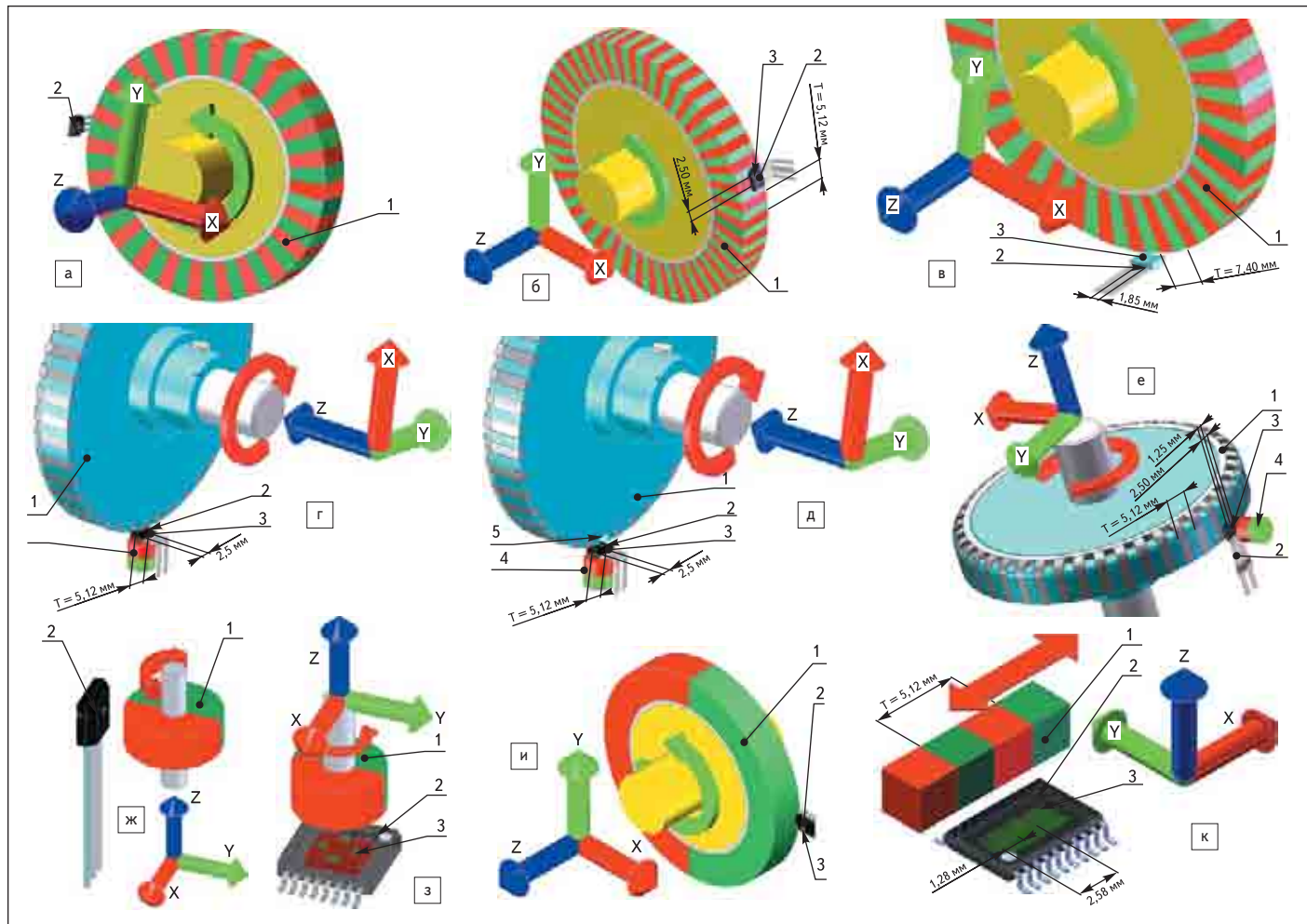


Рис. 4. Известные задачи оптимизации магнитных систем датчиков положения/скорости с комбинированием функций на основе эффекта Холла (классификация типичных задач, дающих хорошие результаты измерений):

а–в) импульсные датчики положения/скорости многополюсного магнитного ротора (зашелкивающий (а); дифференциальный (б); энкодер (в):

1 — кольцевой многополюсный магнитный ротор; 2 — датчик Холла: защелка с одним элементом Холла — A3280 Allegro (а), дифференциальная ИС Холла с двумя элементами Холла, разнесенными на 2,50 мм — TLE4921 (б), одноосевой энкодер с двумя элементами Холла, разнесенными на 1,85 мм — MLX90224 Melexis (в); T — магнитный период ротора;

г–е) импульсные датчики положения/скорости ферромагнитного зубчатого ротора с аксиальным магниточувствительным элементом (дифференциальный датчик скорости (г–е), импульсный датчик с функцией цифровой индикации положения (д), дифференциально-энкодерный датчик с функцией направления (е)):

1 — штампованный ферромагнитный зубчатый ротор; 2 — дифференциальный датчик с двумя или тремя элементами Холла: дифференциальная ИС Холла с двумя элементами Холла, разнесенными на 2,50 мм — TLE4921 (г–д), дифференциальная ИС Холла с тремя элементами Холла — крайними, разнесенными на 2,5 мм относительно друг друга, и третьим центральным элементом — TLE4953 Infineon; 3 — элементы Холла; 4 — обратносмещающий магнит; T — период повторения кодовых элементов ротора; 5 — пропущенный кодовый элемент ротора (д);

ж–и) датчики дипольного магнитного ротора (линейный (аналоговый) датчик углового положения ротора (ж), торцевой двухосевой датчик углового положения дипольного магнитного ротора, вращающегося параллельно поверхности ИС — без или с ИМК (з), датчик положения дипольного кольцевого магнита, магнитное поле которого при вращении параллельно поверхности ИС двухосевого энкодера (с ИМК) (и)): 1 — дипольный магнитный ротор; 2 — датчик Холла: аналоговый датчик с одним чувствительным элементом Холла — HAL805 Micronas Intermetall (ж); двухосевой дифференциальный энкодер перпендикулярного поля без ИМК — AS504x Austriamicrosystems (з); двухосевой дифференциальный энкодер Холла параллельного поля с ИМК -MLX90316; 3 — планарные элементы Холла (крестообразный массив) (ж–з); 3 — ИМК (и);

к) полностью дифференциальный линейный энкодер на основе iC-ML iC Haus: 1 — магнитная линейка с периодом кодирования T = 5,12 мм;

2 — дифференциальный линейный энкодер iC-ML с четырьмя элементами Холла; 3 — элементы Холла, разнесенные на 1,28 мм относительно друг друга и на 2,58 мм парно

именно высокоточные вычисления поля в воздушных зазорах и областях, близлежащих домену бесконтактного взаимодействия в сенсорной части датчика. Всю задачу можно решить гибридным способом, согласно которому МГЭ используется для вычисления поля в воздушной области, МКЭ — для вычисления поля в нелинейном железе.

Эффект Холла линейно зависит от вектора магнитной индукции B в измерительной точке системы, который может быть рассчитан посредством МКЭ/МГЭ. Аналогичные эффекту Холла принципы создания конст-

руктивных схем положены и в основу эффектов АМР/ГМР (рис. 5–6). Хотя эти эффекты возникают при изменении направления поля, а не магнитной индукции, то есть эффекты находятся в косвенной зависимости от магнитного поля, численное моделирование датчиков с МКЭ/МГЭ также может дать эффективные результаты.

Вывод — с теоретической точки зрения для многих современных автомобильных магнитных датчиков метод МГЭ, конечно, интересен как основополагающий, хотя более универсальное решение можно получить в ре-

зультате применения гибридного подхода, в котором метод МГЭ или МКЭ выбирается как основной. Но такие задачи, как расчет датчика ферромагнитного зубчатого ротора, можно решить на основе применения одного МКЭ. МКЭ обеспечивает универсальность и подходит для расчета любых типов автомобильных датчиков — не только магнитоуправляемых, но и индуктивных, емкостных.

Цель дальнейшей работы — разработать методику и дать рекомендации по расчету магнитных датчиков при адаптации их в конкретных применениях, показать, какие типы

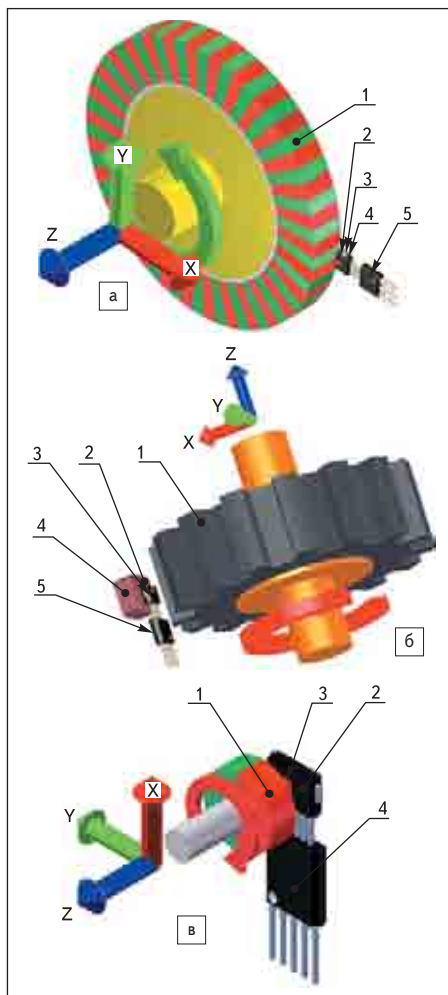


Рис. 5. Измерительные концепции датчиков положения/ скорости на основе эффекта АМР (с элементной базой Philips):

- а) датчик многополюсного магнитного ротора:
 1 — многополюсный магнитный ротор;
 2 — датчик скорости — модуль КМ115-1;
 3, 4, 5 — элементы модуля КМ1:
 3 — закорпсированный магниторезистивный сенсорный элемент;
 4 — стабилизирующий магнит;
 5 — схема обработки сигнала;
- б) датчик ферромагнитного зубчатого ротора:
 1 — ферромагнитный зубчатый ротор;
 2 — датчик скорости — модуль КМ116-1 с элементами:
 3 — закорпсированный магниторезистивный чувствительный элемент;
 4 — обратносмещающий магнит со стабилизирующим подмагничиванием;
 5 — схема обработки сигнала;
- в) датчик дипольного магнитного ротора:
 1 — дипольный магнитный ротор;
 2 — специализированный датчик углового положения — энкодерный модуль КМА200;
 3 — закорпсированный магниторезистивный чувствительный элемент;
 4 — схема обработки сигнала

задач расчета автомобильных датчиков более эффективно решать методом конечных элементов, какие — методом граничных элементов. Действительно, интересно узнать, насколько будут различаться результаты решения одних и тех же задач с применением МКЭ и МГЭ.

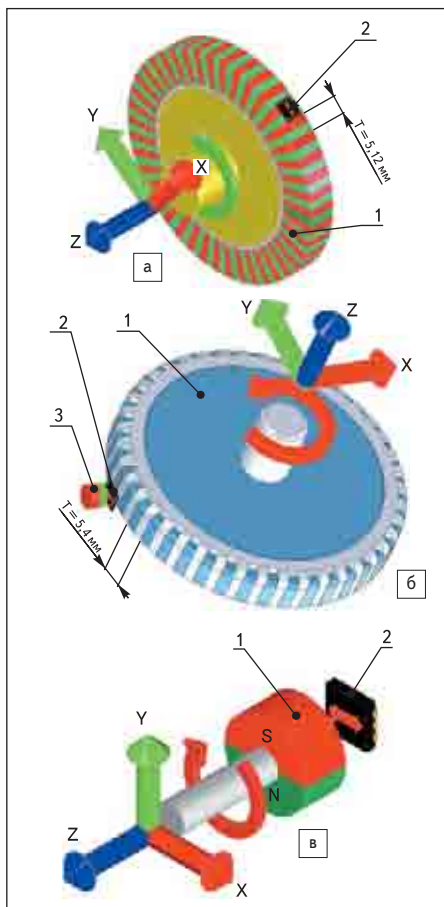


Рис. 6. Измерительные концепции датчиков положения/ скорости на основе эффекта ГМР (с элементной базой NVE):

- а) датчик скорости многополюсного магнитного ротора:
 1 — многополюсный магнитный ротор;
 2 — дифференциальный датчик скорости — AKL001-12;
 T — период магнитного кодирования ротора;
- б) датчик ферромагнитного зубчатого ротора:
 1 — ферромагнитный зубчатый ротор;
 2 — датчик скорости — AKL001-12;
 3 — обратносмещающий магнит;
- в) датчик дипольного магнитного ротора:
 1 — дипольный магнитный ротор;
 2 — специализированный датчик углового положения AAV001-11/AAV002-11

Обзор пакетов, применяемых для моделирования магнитных полей

Геометрическое моделирование, симуляция и прототипирование с современным программным обеспечением CAD/CAE (Computer-Aided Engineering) позволяет не только оптимизировать конструкцию и функциональные свойства датчика, снизить время разработки изделия и срок сдачи его в производство, но и гарантировать отсутствие рисков, повышение качества изделий в ppm, снижение цены и, в конечном итоге, — повышение дорожной безопасности и комфорта для широкого круга потребителей по более низкой цене.

Необходимость развития концепции реального применения CAE-пакетов для разработки и расчета автомобильных датчиков

положения/ скорости, в сочетании с компьютерным геометрическим и численным моделированием, очевидна.

Не только положение и скорость, но и другие параметры и свойства датчиков — температура, магнитные поля, механические напряжения — могут быть промоделированы на ПК прежде изготовления прототипов или экспериментальных установок, что даст значительную экономию денежных и временных ресурсов (несколько дней или недель вместо нескольких месяцев) [8–10]. Можно изучать различные новые идеи и концепции дизайна, оптимизировать различные схемы и уже затем производить закупки и заказы нужных магнитов и ферромагнитных частей, экспериментально подтверждать правильность сделанных расчетов в ходе испытаний. Но перед этим важно принять правильное решение о приобретении действительно необходимого программного пакета.

Как ресурс, информирующий о производителях программного обеспечения для расчета магнитных полей, в данную статью включена таблица 3.

Для получения дополнительной информации по данному вопросу рекомендуем ссылки [11–16].

Из перечисленных программ в России, например, получил широкое распространение пакет Ansys, основанный на применении МКЭ, но обычно применение этого пакета ассоциируется с расчетами механических конструкций, а не магнитных полей, хотя такая возможность предусмотрена.

Большинство других производителей программного обеспечения использует МКЭ. Исключением является компания Integrated Engineering Software, продвигающая концепцию расчета магнитных полей посредством МГЭ и гибридных методов.

Например, Dexter Magnetic Technologies (DMT) — известный производитель магнитных источников — использует пакеты Integrated Magneto и Amperes еще с 1993 года.

Компания Integrated Engineering Software является разработчиком и многих других пакетов на основе МГЭ, включающих:

- COULOMB — пакет для 3D-расчетов электростатических и квазистатических электрических полей — например, для расчета емкостных датчиков положения или MEMS-датчиков;
- FARADAY — 3D-решающее устройство для полей вихревых токов;
- LORENTZ — 2D/3D-пакет для электромагнитного анализа заряженных частиц;
- SINGULA — 3D-пакет для электромагнитного анализа высокочастотных излучаемых полей и взаимодействий;
- MAGNETO — 2D/RS-пакет (Rotationally Symmetric) для магнитного дизайна, также рекомендованный для расчета магнитных датчиков;
- ELECTRO — 2D/RS-симулятор электростатических полей;

Таблица 3. Список производителей программного обеспечения для расчета магнитных полей и магнитных систем

| Компания | Программный продукт | Метод расчета |
|---|---|---------------|
| Ansoft Corporation, ht tp://w ww.ansoft.c om/ | Maxwell EM 2D и 3D, другие (ht tp://w ww.ansoft.c om/products.c fm) | МКЭ |
| Ansys, Inc., w ww.ansys.c om | ANSYS Emag, ANSYS Multiphysics, Icemax, Icewave | МКЭ |
| Cedrat SA, ht tp://w ww.cedrat.c om/ | FLUX2D & FLUX3D | МКЭ |
| Electromagneticworks, Inc., ht tp://w ww.electromagneticworks.c om/ | EMS (3D) | МКЭ |
| Field Precision, ht tp://w ww.fieldp.c om/ | Magnet Design Toolkit, Advanced Magnetic Field Design Suite, Universal BField Toolkit | МКЭ |
| Finite Element Method Magnetics, ht tp://femm.foster-miller.n et/ | FEMM (2D) | МКЭ |
| Infolytica Corporation, ht tp://w ww.infolytica.c om/ | MagNet и другие | МКЭ |
| Integrated Engineering Software, ht tp://w ww.integratedsoft.c om/ | Magneto, Amperes (см. далее) | МГЭ |
| Magssoft Corporation, ht tp://w ww.magssoft-flux.c om/ | FLUX2D, FLUX3D | МКЭ |
| QuickField, ht tp://w ww.quickfield.c om/ | FEA | МКЭ |
| w w.permagsoft.c om | PS-PERMAG | МКЭ |
| THOMATRONIK, ht tp://w ww.thomatronik. de/ | Opera 2D/3D, Magnetics Designer | МКЭ |
| Vector Fields Ltd., ht tp://w ww.vectorfields.c om/ | Opera | МКЭ |

- OERSTED — 2D/RS-симулятор полей вихревых токов;
- KELVIN, CELSIUS и ELASTO — пакеты для связанных тепловых/механических и электромагнитных компонентов, рекомендуемые, в частности, для автомобильных применений.

Пакет Amperes компании Integrated Engineering Software, который выбрали для своих прикладных расчетов специалисты инновационной компании ММТ, основан на МГЭ, что предполагает отсутствие дискретизации для воздушных областей и зазоров — очерчиваются и дискретизируются только контуры элементов САД-модели.

Необходимо отметить, что САД-модель может быть создана во встроенной САД-системе Amperes (в некоторых случаях это является преимуществом), альтернативно пакет может прочитывать САД-модели других известных систем геометрического моделирования. Материалы либо выбираются из библиотеки, либо свойства назначаются пользователем, который может, на-

пример, задать $B(H)$ -кривую нелинейного материала. Все эти функции обеспечивает препроцессор. Amperes позволяет моделировать обмотки (Amp Turns) и постоянные магниты.

После задания геометрической модели граничные элементы помещаются на контурах поверхностей САД-модели. Затем пакет выполняет инженерные вычисления: зависимость магнитного поля тока от положения цели, сравнение различных расположений элементов, зазоров, силы в выбранных точках, расчет минимально необходимой толщины ферромагнитного материала. Анализируя, например, графики зависимостей индукции магнитного поля от положения или расположения, инженер может оценить точность проектируемого устройства в конкретных рабочих условиях.

Производители конечно-элементного программного обеспечения также идут навстречу производителям автомобильных датчиков.

Примером является существующий в 2D и 3D-версиях пакет Flux Studio компании

CEDRAT, позволяющий совмещать электромагнитный и тепловой анализ любых типов сенсорных устройств и систем (рис. 7). Пакет поддерживает интерфейс с MATLAB SIMULINK, FLUENT, MrCCCI, EMTP, IcePak, Ansys и включает много средств для ускорения симуляции и получения точных результатов, таких как средства построения геометрической модели, возможность импорта САД-файлов (STEP, IGES, DXF, SAT файлы и форматы CATIA, PRO/E, Inventor) и объектов из пользовательской библиотеки. Препроцессор Flux обеспечивает многие необходимые средства для определения данной модели: автономный параметрический дескриптор геометрии, допускающий как импорт САД-файлов, так и средства задания геометрии, база данных материалов, схемная привязка, микшированный генератор сетки. Препроцессор Flux предоставляет пользователю возможность симуляции статических, гармонических и переходных состояний, включая механическую и электрическую привязку к модели (с учетом, например, перерыва в работе при разряде конденсатора). Flux позволяет также изучать тепловые процессы, наводимые электромагнитно, а также осуществлять привязывание переключателей, индукторов, конденсаторов, проводников для анализа работы устройства в составе электрической схемы, электромеханический 2D/3D-анализ для симуляции подвижного устройства (с учетом, например, массы, трения, жесткости пружины) и вычисления механических величин (скорости, положения, силы).

Многопараметрический решатель Flux позволяет вычислять разные конфигурации (многопозиционные вычисления, постоянная скорость или переходные процессы) при варьировании геометрических, схемных параметров, материалов и находить их оптимальный набор.

Многопараметрический постпроцессор FLUX позволяет получать также и различные результаты (распределение плотности магнитного потока, токи, напряжения, силы, ско-

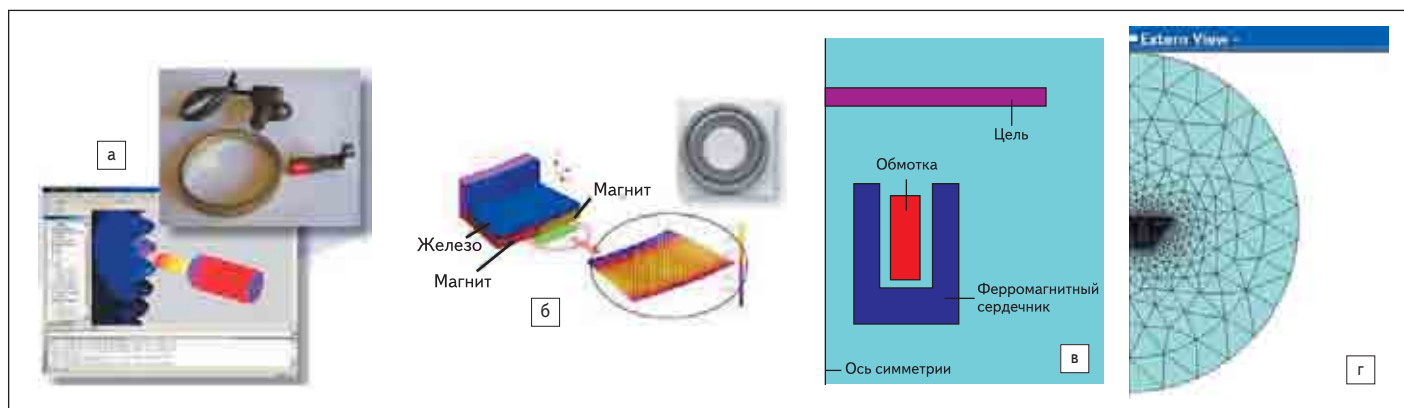


Рис. 7. Симуляция электромагнитных полей датчиков с основанным на МКЭ пакетом Flux Studio Cedrat: а) визуализация моделирования индуктивного датчика скорости АБС; б) моделирование датчика, встраиваемого в подшипники; в—г) моделирование индуктивного датчика близости: геометрическая модель задачи (в) и симуляция (г)

рость, положение), используя различные форматы (цветные карты, 2D/3D-кривые, значения на дисплее, AVI-анимацию).

Встроенный модуль Motor Overlays обеспечивает возможность создания новых моделей двигателей (геометрия, сетка, обмотки), используя библиотечные формы роторов, слотов статоров, типы обмоток.

Различные методы симуляции делают FLUX мощным средством для изучения конфигурации устройства.

Заключение

Вообще говоря, развитие концепции математического и расчетного моделирования для улучшения характеристик датчиков скорости/положения не может сводиться к углублению теории и завершаться применением перечисленных САД/САЕ-пакетов. Необходимо разрабатывать оригинальную методику именно для датчиков положения/скорости, конкретно — для автомобильных датчиков положения/скорости. Задачу можно определить и шире — именно для автомобильных датчиков, в зависимости, конечно, от их классификационного статуса (магнитоуправляемые, MEMS или, к примеру, радары). Эту концепцию подтверждает существование значительного числа MEMS САД-пакетов. В будущем такие параметры, как точность, а также SNR, абсолютная нелинейность, проектировщик сможет оценивать в рамках одного программного пакета — некоего Hall Automotive САД, для чего необходима единая теоретическая база знаний, дальнейшей систематизации которых и была посвящена эта статья. ■

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля. 5-е изд. М. 1967.
2. Klimpke B. A Hybrid Magnetic Field Solver Using a Combined Finite Element/Boundary Element Field Solver. Integrated Engineering Software/Enginia Research. Presented at the U.K. Magnetics Society Conference «Advanced Electromagnetic Modelling & CAD for Industrial Application». Feb. 19, 2003.
3. Klimpke B. A Hybrid Magnetic Field Solver Using a Combined Finite Element/Boundary Element Field Solver. Integrated Engineering Software/Enginia Research. Sensors Magazine. May 2004.
<http://www.integratedsoft.com/papers/research/hybrid/>
4. Boundary Element Method (BEM) for Engineering Simulation.
<http://www.integratedsoft.com/bem.asp>
5. Bulent Y. Y., Klimpke B. W., Prasad K. M. Three Dimensional Analysis of Magnetic Fields Using the Boundary Element Method. Integrated Engineering Software Inc. September 1991, PCIM Conference.
http://www.integratedsoft.com/papers/techdocs/tech_1mx.pdf
6. Judge T. N. Simulation of Nonlinear Magnetic Devices Using Boundary Element Method Based Software Tools., Enginia Research Inc., Canada.
http://www.integratedsoft.com/papers/techdocs/tech_10mx.pdf
7. Захаров И. С., Яцун С. Ф., Сысоева С. С. Исследование параметрической чувствительности датчика скорости автомобиля в условиях погрешностей его монтажа // Телекоммуникации. 2004. № 6.
8. Imitating Life: An Introduction to Computer Simulation and Modeling. Part 1. Ramsden Ed, Lattice Semiconductor Corp. Sensors Magazine. May 2002.
<http://archives.sensorsmag.com/articles/0502/14/>
9. Imitating Life: An Introduction to Computer Simulation and Modeling. Part 2. Ramsden Ed, Lattice Semiconductor Corp. Sensors Magazine. June 2002.
<http://archives.sensorsmag.com/articles/0602/life/>
10. Using CAE Software to Build a New Position Sensor. Sensors Magazine. March 1998.
<http://archives.sensorsmag.com/articles/0398/cae0398/index.htm>
11. http://www.arnoldmagnetics.com/mtc/fea_bea_software.htm
12. <http://www.boundary-element-method.com/>
13. <http://www.finite-element-method.info/>
14. <http://emclab.umn.edu/csoft.html>
15. <http://www.ukmagsoc.org.uk/index.php?page=DoResource&category=CAD%20Systems%20%25>
16. http://homepage.usask.ca/~ijm451/finite/fe_resources/