

В.Я. ГАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ЛГМУ,
Луганск

Д.Л. ОСТАПУЩЕНКО, аспирант, ЛГМУ, Луганск

Т.В. ВОРОБЬЕВА, преподаватель, ЛГМУ, Луганск

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА КОНФИГУРАЦИИ
ИНФОРМАЦИОННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ОБЪЕКТОВ С ДЕФЕКТАМИ СПЛОШНОСТИ ПРИ
МАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ**

Проведен анализ особенностей решения задач численного исследования пространственных информационных магнитных полей ферромагнитных объектов с дефектами сплошности с учетом нелинейных характеристик материала при магнитном неразрушающем контроле. Выявленные особенности позволяют сделать вывод о большей сложности таких задач по сравнению с традиционными задачами электротехники.

Проведено аналіз особливостей розв'язання задач численного дослідження інформаційних магнітних полів феромагнітних об'єктів з дефектами суцільності при магнітному неруйнівному контролі. Виявлені особливості дозволяють зробити висновок про більшу складність таких задач у порівнянні з традиційними задачами електротехніки.

Введение. При магнитном методе неразрушающего контроля решение задачи выбора вида, способа и режима намагничивания конкретного объекта сложной геометрической формы невозможно осуществить без исчерпывающей информации о конфигурации информационного магнитного поля в зоне контроля. Особенно ценной является информация о конфигурации поля при наличии дефектов сплошности различного вида, характерных для контролируемого изделия при различных условиях намагничивания. Выбор в пользу той или иной схемы намагничивания должен производиться исходя из соображений наилучшей выявляемости дефектов при ее использовании. Изготовление большого числа опытных образцов магнитных систем с целью дальнейшего их испытания путем экспериментального исследования топографии полей для изделий с различными дефектами не только может занять значительное время, но и является экономически нецелесообразным.

Важным инструментом, который может облегчить решение данной задачи является математическое моделирование. Анализ публикаций по данному вопросу показал, что создание как можно более адекватных математических моделей, позволяющих описать пространственную конфигурацию магнитного поля в различных случаях контроля, привлекает к себе внимание многих исследователей. Однако существующие на данный момент модели обладают значительной степенью идеализации, резко ограничивающей возможность их практического применения. Описанные в работах ряда авторов аналитические модели поверхностных и подповерхностных дефектов сплошности построены в предположении бесконечных или полубесконечных размеров объекта контроля и не позволяют адекватно описать влияние на конфигурацию поля в зоне контроля его формы. При аналитических исследованиях попытки построения моделей для объектов контроля конечных размеров с дефектами ограниченной протяженности сталкиваются с непреодолимыми трудностями. Более перспективным представляется использование численных методов. Для построения численных моделей рядом исследователей был использован подход, основанный на нелинейных пространственных интегральных уравнениях. Этот метод позволяет проводить анализ топографии магнитного поля в расчетных областях с произвольной геометрией. За исключением некоторых простейших случаев исходное интегральное уравнение не имеет аналитического решения и для получения численного результата необходимо прибегнуть к различным аппроксимационным схемам, позволяющим свести континуальное уравнение к системе нелинейных уравнений с конечным числом неизвестных. При этом решение задачи приближенного описания формы объекта контроля определяет класс задач, для которых применима получаемая в результате численная модель.

Анализ моделей. Существующие в настоящее время численные модели имеют ряд существенных ограничений при описании геометрии объекта контроля, что сужает область их применения и ограничивает ее рядом простейших случаев. В серии работ [1-4] предложено программное обеспечение для решения прямой задачи магнитостатики и вычислительная технология его использования применительно к магнитному неразрушающему контролю объектов произвольной геометрии, основанное на интегральном уравнении вида

$$\vec{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_Q \iiint_V \vec{M}(P) \cdot \text{grad}_P \frac{1}{r_{PQ}} dV_P + \vec{H}_0(Q),$$

где P и Q – соответственно точки истока и наблюдения, принадлежащие ферромагнитному объекту контроля V ; $\vec{r}_{PQ} = \vec{r}_Q - \vec{r}_P$ – вектор, направленный из точки P в точку Q ; r_{PQ} – модуль вектора \vec{r}_{PQ} ; \vec{H} – напряженность магнитного поля; \vec{M} – намагниченность ферромагнетика; \vec{H}_0 – напряженность магнитного поля, создаваемого намагничивающим устройством в виде системы проводников с током, электромагнитов или постоянных магнитов, определяемая в соответствии с математической моделью для каждого конкретного его типа. Уравнение решается совместно с дополнительной зависимостью, описывающей магнитные свойства вещества

$$\vec{M} = F(\vec{H}).$$

Специфика области применения резко разграничивает возникающие в ней задачи и сходные задачи, возникающие в электротехнике. Контроль в приложенных полях, как правило, ведется при намагничивании объекта до состояния, при котором ферромагнитное вещество близко к насыщению. При численном моделировании этот факт приводит к трудностям построения глобально сходящихся итерационных процессов решения систем нелинейных уравнений. К тому же размер дефектов значительно меньше размера самого контролируемого изделия.

Для построения дискретной геометрической модели в разработанном авторами программном обеспечении используются генераторы адаптивной сети дискретных элементов, состоящей из тетраэдров. Использование адаптивных сетей тетраэдров позволяет значительно повысить аппроксимационные возможности используемого подхода. Однако относительно малый размер дефектов и требования к более точному описанию формы дефектных объектов обуславливают необходимость использования более густых сетей, что приводит к большому числу неизвестных в системе нелинейных уравнений. Кроме того, необходимость использования нерегулярных сетей предопределена также тем фактом, что регистрация полей дефектов первичными преобразователями осуществляется в непосредственной близости от поверхности объекта на расстоянии 0,1 – 5 мм. Это в свою очередь требует расчета со-

ставляющих информационного магнитного поля в прилежащих к поверхности объекта контрольных точках, а, следовательно, повышенным требованиям к числу элементов дискретизации.

Для решения систем нелинейных уравнений в [1, 4] с использованием метода Ньютона и комплекса мероприятий по улучшению его сходимости построена итерационная схема, ориентированная на задачи с большим числом неизвестных, которое в некоторых случаях может достигать 75000. Известно, что теорема Канторовича гарантирует лишь локальную сходимость метода Ньютона с начального приближения достаточно близкого к искомому решению.

Для обеспечения глобальной сходимости итерационного процесса предлагается комплексное использование метода продолжения по параметру и "демпфирования". Метод продолжения по параметру позволяет связать исходную задачу, со сходимостью итерационного процесса в которой возникли трудности, с задачей, в которой наблюдается глобальная сходимость, например, в предположении линейности магнитных характеристик ферромагнетиков. Последовательно решая задачу с постепенным изменением параметра и принимая результат предыдущего шага в качестве начального приближения последующего, удается получить решение исходной задачи. Использование "демпфирования" целесообразно на тех шагах итерационного процесса, когда вместо уменьшения нормы невязки системы наблюдается ее возрастание. Тогда делается неполный шаг метода Ньютона. При этом его величина подбирается исходя из условия минимизации невязки. Кроме того, итерационный процесс имеет смысл строить с учетом возможности перехода с прямой магнитной характеристики для описания нелинейных свойств ферромагнетика на обратную, что определяется положением рабочей точки на кривой намагничивания. На каждом шаге итерационного процесса решается система линейных уравнений большого порядка с плотно заполненной матрицей. Коэффициенты матрицы системы в силу большого числа неизвестных одновременно невозможно разместить в оперативной памяти компьютера. Поэтому решение линейных систем осуществляется с помощью специальной реализации метода последовательных исключений Гаусса с поблочной обработкой коэффициентов и сохранением промежуточных результатов на внешнем носителе компьютера, а также методов, основанных на проецировании на подпространства Крылова.

Все перечисленные особенности делают решение задачи численного анализа информационных магнитных полей объектов с дефектами специфической, что существенно отличает ее от традиционных задач электротехники и позволяет считать ее гораздо более сложной.

Выводы. Таким образом, разработанное информационное обеспечение и вычислительная технология его использования позволяют с единых методологических позиций решать широкий круг разнообразных пространственных задач теории магнитного неразрушающего контроля, таких как анализ полей поверхностных, подповерхностных дефектов сплошности, а также дефектов внутренней поверхности, что делает возможным осуществить рациональный выбор вида, способа и режимов намагничивания дефектного объекта контроля произвольной геометрической формы, руководствуясь условиями наилучшей выявляемости дефекта.

Список источников информации: 1. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л. Численный анализ пространственной конфигурации магнитных полей объектов сложной геометрической формы с учетом нелинейных характеристик веществ. // Информационные технологии. – 2008. – № 8. – С. 43-49. 2. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л., Воробьев М.А. Математическое моделирование процессов намагничивания ферромагнитных объектов контроля с произвольной геометрией в полях заданной пространственной конфигурации. // Дефектоскопия. – 2008. – №9. – С. 3-18. 3. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений. // Дефектоскопия. – 2009. – №3. – С. 56-66. 4. Гальченко В.Я., Остапуценко Д.Л., Воробьев М.А. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей подповерхностных дефектов сплошности конечных размеров и произвольной формы в объектах контроля ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений. // Дефектоскопия. – 2009. – №5. – С. 60-71.

Поступила в редколлегию 6.10.2009