

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПОЛЯ РАССЕЙЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБЪЕКТА В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2025 г. Александр Андреевич Неделько<sup>1\*</sup>, Н.В. Гречишкина<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> – ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»,  
291034 Луганск, кв. Молодежный, д. 20А

\* - [aleksandernedelko@yandex.ru](mailto:aleksandernedelko@yandex.ru), \*\* - [natalisha.grech@mail.ru](mailto:natalisha.grech@mail.ru)

подавляющее большинство ранений в ходе проведения СВО приходится на осколки, которые являются ферромагнитными. Поэтому логичным является применить магнитный метод их выявления, который позволяет неинвазивным способом определить их местоположение без использования рентгена, что особенно важно в полевых условиях. Для уверенного выявления осколков в теле человека их обнаружение необходимо проводить в приложенном магнитном поле. При этом магнитное поле не должно быть сильным, чтобы не притянуть осколок и не получить болевой эффект.

Чтобы перейти к расчету и проектированию магниточувствительного элемента, способного выявлять ферромагнитные осколки в теле человека, определимся с габаритными размерами расчетной модели осколка. За основу примем пулю диаметром 5,45 мм, длиной 25 мм. Для упрощения расчетов в качестве осколка рассмотрим объем прямоугольной формы, размером 25×5,5×5,5 мм, выполненный из стали 45 с величиной коэрцитивной силы от 640 А/см до 2160 А/см (после выстрела, что можно сравнить с процессом закалки) и с величиной остаточной индукции 1,12-1,8 Тл.

Согласно [1] остаточное поле ферромагнитного объекта контроля (ФОК) рассчитывается по следующей зависимости

$$M = M_0 + \chi_0 H,$$

где  $M_0$  – остаточная намагниченность на заданной магнитной характеристике материала ФТ;  $\chi_0$  – обратная магнитная восприимчивость на заданной магнитной характеристике материала ФОК.

Для расчёта намагниченности ФОК представим как совокупность поверхностных и объёмных зарядов [2], а при  $\operatorname{div}\bar{M} = 0$  будем считать, что объёмные заряды отсутствуют, тогда скалярный потенциал источников поля определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi} \oint_S M_n \frac{dS}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_p|},$$

где  $\bar{R}_Q - \bar{R}_p$  – векторы в точку источника и в точку наблюдения,  $S$  – площадь поверхности ФОК,  $M_n$  – нормальная составляющая поверхности ФОК вектора намагниченности.

Определим нормальную составляющую вектора магнитного поля, используя выражение [3]:

$$H_n = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{1}{4\pi} \oint_S M_n \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{|\bar{R}_Q - \bar{R}_p|} \right) dS - \frac{M_n}{2}.$$

Данное уравнение решается численным методом с использованием принятой прямоугольной модели ФОК. Поверхность исследуемой модели разбивается на элементарные площади, в пределах которых  $M_n = const$ .

Такой прием разбиения поверхности ФОК на элементарные площадки дает нам возможность заменить выше обозначенные интегральные уравнения системой линейных алгебраических уравнений [2, 3]:

$$\left\{ [A] + \frac{1}{\chi[1]} \right\} [M_n] = 2[H_{0n}],$$
$$\left\{ [A] + \frac{1}{\chi[1]} \right\} [M_n] = \frac{2[M_{0n}]}{\chi_0}.$$

Решая линейные алгебраические уравнения, определяем значения величины  $M_n$  для каждой элементарной площадки, что дает возможность рассчитать среднее значение нормальной составляющей для каждой грани ФОК.

Полученные значения намагниченности каждой грани ФОК позволяют нам рассчитать напряженность магнитного поля для всех составляющих ФОК на любом расстоянии от контролируемого объекта, что является необходимым условием для последующего проектирования ферромодуляционного магниточувствительного элемента. Применение феррозонда для определения местоположения осколка в теле человека обосновано рассчитанной величиной магнитного поля рассеивания ФОК от 5,47 А/м до 191,3 А/м на расстоянии 50 мм. Такая величина магнитного поля регистрируется ферромодуляционным преобразователем, работающим в режиме градиентометра. Размеры и параметры феррозонда рассчитываются исходя из полученного значения измеряемого магнитного поля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тозони О.В., Майергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. К.: Техника, 1974. 352 с.
2. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей М.: Энергоатомдат, 1984. 164 с.
3. Крутин В.Г., Павлов А.Л., Попов Л.Г. Высшая математика. Уравнения математической физики. Сборник заданий: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 353 с.