



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-197

P13-96-197

С.А.Ивашкевич

РАСЧЕТ МОДУЛИРУЮЩИХ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
КАТУШЕК ДЛЯ ЯДЕРНЫХ МАГНИТОМЕТРОВ

1996

В широкодиапазонных ядерных магнитометрах в зависимости от величины и неоднородности измеряемого поля полезно иметь разные катушки, модулирующие это поле [1]. Ниже дается расчет этих катушек с учетом некоторых особенностей их применения в магнитометрах. При этом имеется в виду тип магнитометра, в котором используются вынужденная прецессия ядер рабочего вещества и модулирующее поле больше ширины сигнала ядерного магнитного резонанса [2,3].

В дальнейшем рассматриваются катушки в виде короткого круглого соленоида со следующими геометрическими параметрами: D и d — соответственно внешний и внутренний диаметр соленоида; h — его высота (длина). В качестве исходного используется взятое из [2] выражение для магнитного поля в центре катушки, которое в принятых обозначениях записывается так:

$$B = \frac{\mu_0 I w}{D-d} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 + h^2}}{d + \sqrt{d^2 + h^2}}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; I — ток в катушке; w — число витков катушки.

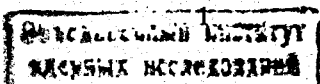
В ядерных магнитометрах модулирующие катушки обычно питаются синусоидальным током низкой частоты (чаще всего 50 Гц), поэтому в расчетах индуктивное сопротивление катушки не учитывается. Если в (1) ток выразить через U_k — эффективное напряжение на катушке и R_k — сопротивление провода, которым намотана катушка, то амплитуда модулирующего поля

$$B_m = \frac{1,41 \mu_0 U_k d_n^2}{2\rho(D^2 - d^2)} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 + h^2}}{d + \sqrt{d^2 + h^2}}. \quad (2)$$

В этом выражении d_n — диаметр провода; ρ — удельное сопротивление материала провода.

При записи (2) использовались известные выражения: $R_k = \rho l_n / S_n$; $l_n = \pi w(D+d)/2$; $S_n = \pi d_n^2/4$. В этих равенствах l_n — длина провода из расчета по среднему радиусу катушки; S_n — сечение провода.

Модулирующие катушки располагаются в датчике магнитометра, поэтому при длинном кабеле, соединяющем датчик с остальной частью прибора, надо



учитывать $R_{\text{пк}}$ — сопротивление проводов в кабеле, по которым подается питающее катушки напряжение. С учетом этого сопротивления и при напряжении на входе кабеля U_0

$$U_k = \frac{U_0}{1 + \frac{R_{\text{пк}}}{R_k}} \quad (3)$$

Выражение

$$R_k = \frac{k_3 \rho h (D^2 - d^2)}{d_{\text{п}}^4}, \quad (4)$$

где k_3 — коэффициент заполнения витков в катушке, нетрудно получить из равенств, использованных при записи (2), и очевидного выражения $w = k_3 h (D - d) / 2d_{\text{п}}^2$.

После подстановки (3) в (2) с учетом (4) в окончательном виде

$$B_M = \frac{1,41 \mu_0 U_0}{2 \left(\rho \frac{D^2 - d^2}{d_{\text{п}}^2} + \frac{d_{\text{п}}^2 R_{\text{пк}}}{k_3 h} \right)} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 + h^2}}{d + \sqrt{d^2 + h^2}} \quad (5)$$

B_M , как функция $d_{\text{п}}$, имеет максимум при

$$d_{\text{п}} = \sqrt[4]{\frac{k_3 \rho h (D^2 - d^2)}{R_{\text{пк}}}} \quad (6)$$

или, иначе говоря, при $R_k = R_{\text{пк}}$. В этом случае максимальная амплитуда

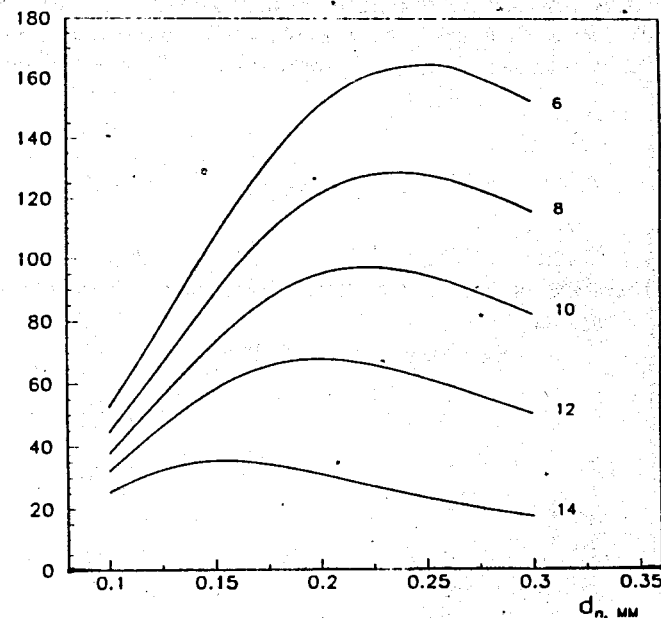
$$B_{M \text{ макс.}} = \frac{1,41 \mu_0 U_0}{4} \sqrt{\frac{k_3 h}{\rho (D^2 - d^2) R_{\text{пк}}}} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 + h^2}}{d + \sqrt{d^2 + h^2}} \quad (7)$$

Напряжение U_0 ограничено сверху мощностью $P_k = U_k^2 / R_k$, рассеиваемой в катушке. Отсюда с учетом (3) при $R_k = R_{\text{пк}}$ и допустимой P_k должно выполняться соотношение

$$U_0 \leq 2 \sqrt{P_k R_{\text{пк}}} \quad (8)$$

Если в магнитометре разные катушки питаются одним напряжением и при этом какая-то катушка должна создавать по возможности большое поле, то

$B_M \times 10^{-4}$, Гл



величины D , h и U_0 надо считать заданными. Они должны быть максимальными, насколько это позволяют габариты датчика (обычно небольшие) и допустимая P_k . В этом случае с некоторым d получить другие требуемые B_M можно, только выбрав соответствующие $d_{\text{п}}$.

Выбирать подходящие d и $d_{\text{п}}$ удобно, имея в виде графиков набор зависимостей B_M от $d_{\text{п}}$ при разных d . На рисунке показаны эти зависимости для пяти значений d (в миллиметрах). Именно они использовались при изготовлении модулирующих катушек для одного из магнитометров. Графики соответствуют $D = 15$ мм, $h = 7$ мм, $k_3 = 0,6$, $R_{\text{пк}} = 3,7$ Ом, $U_0 = 2,7$ В ($P_k = 0,5$ Вт).

После изготовления катушек с $d = 12$ мм и разными $d_{\text{п}}$ их поле измерялось с помощью электронного парамагнитного резонанса. Было установлено, что измеренные поля немного меньше расчетных. Причинами этого могут быть неточности расчетной формулы, изготовления катушек, измерения поля. Анализ причин не делался, так как расхождения расчетных и измеренных величин не превышали приблизительно 10%. Такие расхождения в данном применении катушек не имеют существенного значения.

В заключение автор искренне благодарит коллегу В.В.Калиниченко, внимательно прочитавшего рукопись и сделавшего полезные замечания.

Данные расчеты и их применение являются частью работ по проекту Государственной научно-технической программы «Фундаментальная метрология».

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Ивашкевич С.А. — ОИЯИ, Р13-96-196, Дубна, 1996.
- 2.Афанасьев Ю.В. и др. — Средства измерений параметров магнитного поля. Л.: Энергия, 1979.
- 3.Леше А. — Ядерная индукция. М.: ИЛ, 1963.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июня 1996 года.