

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

814/2-80

25/2-80

P13 - 12897

М.А.Воеводин, А.Д.Коваленко, В.И.Черников

ЧЕТЫРЕХСЕКЦИОННАЯ КАТУШКА
С ОДНОРОДНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

1979

Воеводин М.А., Коваленко А.Д., Черников В.И. P13 - 12897

Четырехсекционная катушка с однородным магнитным полем

Рассчитана и изготовлена система, формирующая магнитное поле с неоднородностью $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ в объеме, близком к сферическому с радиусом 40 мм. Рабочая величина индукции магнитного поля может достигать $5 \cdot 10^{-3}$ Т в статическом режиме и 0,1 Т - в динамическом. Катушка состоит из двух пар секций, первая радиусом 200 мм, вторая - 97,54 мм, и количеством витков 676 и 169 соответственно. Расстояние между секциями первой пары составляет 140 мм, между секциями второй - 269,5 мм. Приведены экспериментальные результаты по определению границ контуров заданной неоднородности магнитного поля, формируемого в различных режимах питания секций. Устройство используется для калибровки различных преобразователей магнитного поля в диапазоне малых и средних величин индукции.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Voevodin M.A., Kovalenko A.D., Chernikov V.I. P13 - 12897

Four-Section Coil with a Uniform Magnetic Field

The system of generation of a uniform magnetic field with errors of about 10^{-5} in sphere of 40 mm radius is described. Operational value of field induction may be equal to $5 \cdot 10^{-3}$ T in statics and 10^{-1} T under pulse regime. The coil consists of two pairs of sections, the first has middle radius of 200 mm and the second - 97.54 mm, the number of turns in sections are 676 and 169, respectively. Longitudinal distance between sections of the first pair is 140 mm and for the other pair it is equal to 269.5 mm. Experimental results associated with equal field error contour determinations are given. The system is used for calibrating different sensitive elements in the region of small and middle values of field inductions.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubno 1979

Для формирования однородных магнитных полей широко используют безжелезные системы, которые обеспечивают наиболее высокую точность воспроизведения значения магнитной индукции, заданную величину неоднородности поля, стабильность характеристик и удобный доступ к рабочему пространству.

В литературе ^{1-3/} описан ряд систем, состоящих из кольцевых и многоугольных катушек, соленоидов, а также комбинации катушек и соленоидов. Рассматриваются как нереальные системы /бесконечно тонкие витки/, так и реальные устройства, состоящие из обмоток значительных поперечных размеров.

Наиболее простая и известная система, формирующая высокооднородное магнитное поле, - это катушки Гельмгольца, состоящие из двух соосных параллельных обмоток, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. В случае круговых обмоток /в приближении тонких катушек/ должно выполняться соотношение $a = 0.5R_0$, где $2a$ - расстояние между катушками, R_0 - средний их радиус. Рассчитаны также катушки Гельмгольца квадратной и прямоугольной форм.

Катушки Гельмгольца являются системой четвертого порядка, т.е.

$$\epsilon \sim \left(\frac{x}{R_0}\right)^4,$$

где $\epsilon = \delta H / H$ - заданная неоднородность поля, x - линейный полуразмер области заданной неоднородности.

Если, например, надо создать поле с неоднородностью $\epsilon \leq 10^{-5}$ в области с линейным размером $2x = 20$ см, то потребуются катушки радиусом $R_0 \approx 170$ см.

Ясно, что для формирования полей с высокой степенью однородности в большей области следует применять системы шестого, восьмого и т.д. порядков. Системой восьмого порядка является, например, система, состоящая из двух пар соосно расположенных секций /обмоток/, имеющих общую плоскость симметрии.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ ИЗ ЧЕТЫРЕХ СЕКЦИЙ

На рис. 1 показано взаимное расположение секций. Обозначим через (R, θ, Φ) - сферические, а через (Z, P, Φ) - цилиндрические координаты точки Q, в которой ищем значение магнитного поля, а через (r, θ, ϕ) и (z, ρ, ϕ) - соответственно сферические и цилиндрические координаты точки s - источника поля.

Компоненты магнитного поля в центральной зоне пары круговых секций можно представить в виде /5/:

$$\left. \begin{aligned} H_Z(R, \theta) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left[\frac{d^n}{dZ^n} H_Z(Z, 0) \right]_{Z=0} \cdot R^n P_n(\cos \theta), \\ H_P(R, \theta) &= - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+1)!} \left[\frac{d^n}{dZ^n} H_Z(Z, 0) \right]_{Z=0} \cdot R^n \sin \theta \cdot P'_n(\cos \theta) \end{aligned} \right\} /1/$$

где $H_Z(Z, 0) = 0.4 \pi i w \frac{\sin^2 \theta}{r} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{Z}{r} \right)^{2m} P'_{2m+1}(\cos \theta),$

$P_n(\cos \theta), P'_n$ - полиномы Лежандра и их производные.

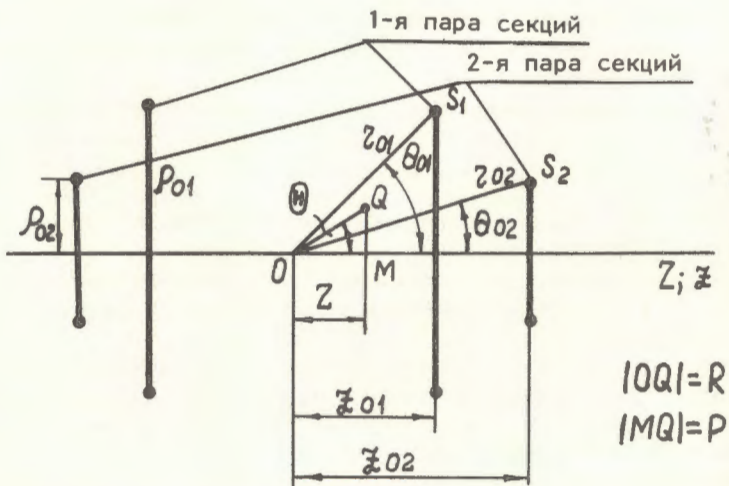


Рис. 1. Схема расположения секций и характерные размеры.

После нахождения производных $H_Z(Z, 0)$ по Z и подстановки в /1/ получим:

$$\left. \begin{aligned} H_Z(R, \theta) &= 0.4 \pi i w \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin^2 \theta}{r} \left(\frac{R}{r} \right)^{2m} P'_{2m+1}(\cos \theta) \cdot P_{2m}(\cos \theta) \\ H_P(R, \theta) &= -0.4 \pi i w \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin^2 \theta}{r} \left(\frac{R}{r} \right)^{2m} \frac{P'_{2m+1}(\cos \theta)}{2m+1} \sin \theta \cdot P_{2m}(\cos \theta) \end{aligned} \right\} /2/$$

Поле системы из двух пар секций, имеющих общую плоскость симметрии $Z=0$, получается путем суммирования полей от каждой из пар катушек, т.е.

$$\left. \begin{aligned} H_Z(P, \theta) &= 0.4 \pi i \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \left(\frac{R}{r_{on}} \right)^{2m} P_{2m}(\cos \theta), \\ H_P(R, \theta) &= -0.4 \pi i \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \left(\frac{R}{r_{on}} \right)^{2m} \frac{\sin \theta}{2m+1} P_{2m}(\cos \theta) \end{aligned} \right\} /3/$$

где

$$C_{mn} = w_n \frac{\sin^2 \theta_{on}}{r_{on}} P'_{2m+1}(\cos \theta_{on}), \quad /4/$$

w_n - число витков, n - число пар секций, i - ток в обмотках. Магнитное поле в центре системы:

$$H_Z(0, 0) = 0.4 \pi i \sum_{n=1}^{\infty} w_n \frac{\sin^2 \theta_{on}}{r_{on}}, \quad /5/$$

а отклонение величины продольной составляющей от ее значения в центре системы будет:

$$\Delta H_Z = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \left(\frac{R}{r_{on}} \right)^{2m} P_{2m}(\cos \theta). \quad /6/$$

Под заданной неоднородностью поля подразумевается величина

$$\epsilon = \frac{1}{H_Z(0, 0)} (\Delta H_Z^2 + H_P^2)^{1/2}. \quad /7/$$

Для идеальной системы восьмого порядка выполняется условие

$$\sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^2 C_{mn} \frac{1}{r_{on}^{2m}} = 0, \quad /8/$$

исходя из которого, получаем для ΔH_Z и H_P следующие выражения:

$$\Delta H_z = \sum_{n=1}^2 \left[C_{4n} \left(\frac{R}{r_{on}} \right)^8 P_8(\cos \theta) + C_{5n} \left(\frac{R}{r_{on}} \right)^{10} P_{10}(\cos \theta) + \dots \right]$$

$$H_p = - \sum_{n=1}^2 \left[\frac{C_{4n}}{9} \left(\frac{R}{r_{on}} \right)^8 \sin \theta \cdot P_8'(\cos \theta) + \frac{C_{5n}}{11} \left(\frac{R}{r_{on}} \right)^{10} \sin \theta \cdot P_{10}'(\cos \theta) + \dots \right]$$

/9/

Параметры системы определяются из уравнения /8/. Обычно принимают $r_{01} = 1/\sin^2 \theta_{01}$, т.е. радиус внутренней пары секций $\rho_{01} = 0$ и, кроме того, $w_1 = 1$. Остальные величины выражаются в виде отношения к ρ_{01} и w_1 .

После задания геометрических характеристик, пользуясь /7/-/9/, определяем границы контуров заданной неоднородности:

$$R/\rho_{01} \equiv R = f(z_{01}, \epsilon).$$

На основании изложенной методики было рассчитано несколько систем восьмого порядка, предназначенных для формирования магнитного поля с напряженностью $H_z(0,0) \approx 50$ Э и областью неоднородности $\delta H \approx 10^{-5}$ размером $2R \approx 100$ мм. В принципе указанным условиям удовлетворяет бесчисленное множество вариантов, но по условиям эксплуатации в нашем случае необходимо, чтобы расстояние между внутренней парой катушек было ≥ 100 мм. Если принять $z = 70,00$ мм, то остальные геометрические характеристики будут*: $r_{02} = 97,54$ мм, $r_{01} = 200,0$ мм, $z_{02} = 134,75$ мм, $w_1/w_2 = 4,0$.

Рассмотрим теперь факторы, ухудшающие однородность магнитного поля в реальном устройстве.

1. Отклонение средних радиусов катушек и их продольное смещение относительно плоскости $Z=0$. Если допустить сокращение размера области заданной неоднородности на 10% за счет указанных погрешностей, то получаем следующую оценку:

$$\Delta a_i / a_i \leq \pm 2,4 \cdot 10^{-4}, \text{ где } a_i - \text{номинальный размер.}$$

Таким образом, для нашего устройства: $\Delta r_{01} \leq \pm 0,05$ мм, $\Delta r_{02} \leq \pm 0,025$ мм, $\Delta z_{01} \leq \pm 0,02$ мм, $\Delta z_{02} \leq 0,035$ мм.

2. Несоосность катушек и перекосы их плоскостей относительно плоскости $Z=0$. С учетом допусков на отклонение геометрических размеров получаем:

а/ величина смещения центров катушек относительно продольной оси не должна превышать $\delta_{1,2} \leq \pm 0,015$ мм;

б/ допустимые угловые отклонения плоскостей катушек относительно плоскости симметрии $\gamma_1 \leq \pm 25''$, $\gamma_2 \leq \pm 0,25'$.

* При равных токах в отдельных секциях катушки.

3. Искажения магнитного поля, обусловленные неполной компенсацией поля токоподводов в реальной конструкции будут тем меньше, чем больше витков в секциях катушки. Для рассматриваемого случая количество витков в секциях большего диаметра следует брать не меньше 600.

4. Искажения магнитного поля могут быть вызваны наличием вблизи образцовой магнитной меры ферромагнитных материалов. Оценка показывает, что отдельные ферромагнитные материалы должны быть удалены от устройства на расстояние $10b/b$ - характерный размер ферромагнетика/.

Исходя из ограничений на величину магнитного поля и требуемого соотношения ампер-витков, определяем необходимое количество витков в катушках: $w_1 = 676$, $w_2 = 169$ *. И, наконец, принимая допустимую плотность тока в проводнике $j = 2,5$ А/мм², вычисляем диаметр провода для намотки катушек: $d \approx 0,8$ мм.

КОНСТРУКЦИЯ 4-СЕКЦИОННОЙ КАТУШКИ

Каркас катушки изготовлен из плексигласового блока. Две пары секций, создающие магнитное поле, размещены в пазах сечениями $20,04 \times 20,04$ мм² и $10,02 \times 10,02$ мм², изготовленных с высокой точностью на токарном станке с одной установки. В каркасе выполнены два взаимно-перпендикулярных цилиндрических канала диаметром 110 мм, которые служат для размещения исследуемых образцов в рабочей области катушки. Предусмотрена возможность размещения в центральной области подвижного столика для установки на нем исследуемых датчиков. Обмотки выполнены из медного провода ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм. Витки обмотки прижимаются к каркасу клееными по азимуту вкладышами из оргстекла. Концы каждой секции скручены между собой и максимально удалены от катушки. Можно осуществлять как последовательное, так и параллельное включение обмоток. Катушка была закрыта защитными колпаками, которые одновременно служат основанием конструкции. Общий вид катушки, не закрытой колпаками, показан на рис. 2.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Исследование однородности магнитного поля проводилось индукционным магнитометром /8/ с датчиком маятникового типа. Магнитометр обеспечивал точность относительных измерений не

* При всех названных параметрах магнитная индукция в центре имеет величину $B(0,0) = 4,02 \cdot 10^{-3}$ т (Т).

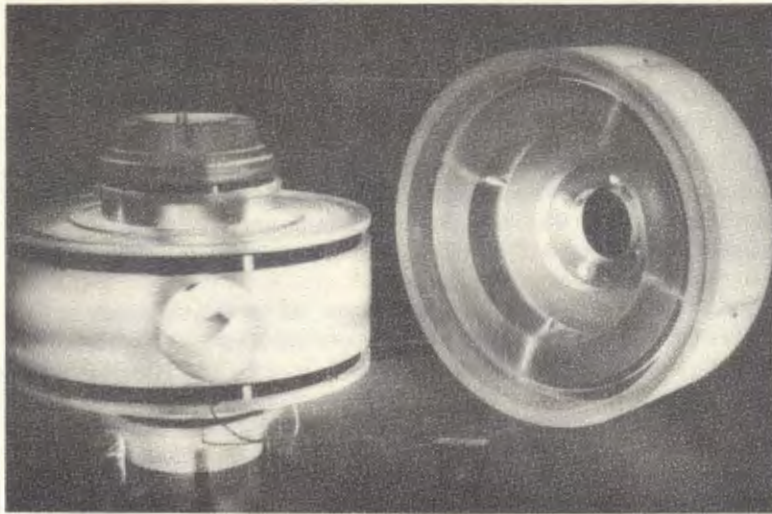


Рис. 2. Общий вид катушки без защитных колпаков.

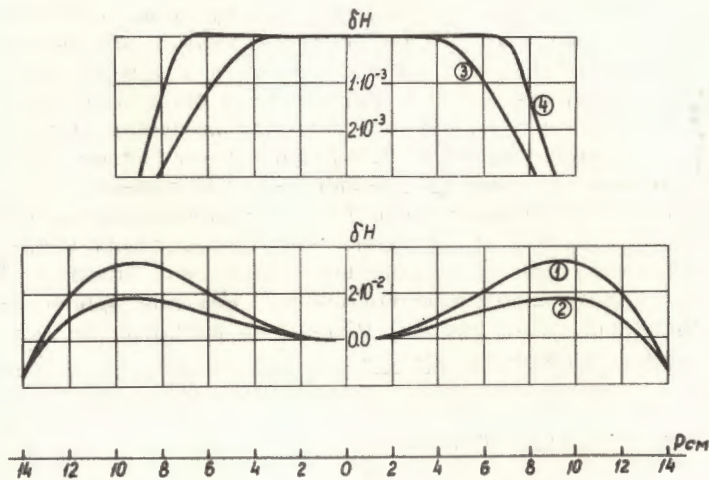


Рис. 3. Неоднородность магнитного поля по оси катушки: 1,2,3 - параллельное, 4 - последовательное включение обмоток.

хуже 10^{-4} . Результаты измерений, относящиеся к медианной поверхности системы, приведены на рис. 3. Кривые 1,2,3 соответствуют режиму параллельного питания секций, а кривая 4, - последовательному.

Большая неоднородность магнитного поля при параллельном включении секций объясняется тем, что величины импульсных токов в секциях устанавливались равными лишь с точностью $\sim 5\%$. Однако и в этом случае путем подбора величин токов во внешних секциях можно существенно уменьшить неоднородность в рабочей области устройства /кривая 3/. Параллельное включение секций может быть рекомендовано для питания катушки от низковольтного источника в целях увеличения магнитного поля при пониженном требовании к величине неоднородности.

Наименьшая неоднородность магнитного поля в большем объеме рабочего пространства соответствует последовательному включению секций /кривая 4/.

Ток в экспериментах измерялся цифровым вольтметром Щ1513, обеспечивающим относительную точность измерения $1 \cdot 10^{-4}$, и показания магнитометра приводились к одному значению тока.

Несмотря на то, что используемая аппаратура не позволяла непосредственно определить размер области с неоднородностью меньше, чем 10^{-4} , можно, следуя методике, изложенной в работе [2], определить эту границу, исходя из экспериментально полученного размера области с известной неоднородностью, пользуясь соотношением:

$$R_x = R_0 \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_0} \right)^{1/\lambda}$$

где R_0 - размер области известной неоднородности ϵ_0 ; ϵ_x - неоднородность, размер области которой мы хотим определить, λ - порядок системы формирования поля.

Для последовательного соединения обмоток получаем: неоднородность 10^{-4} ограничена размером 5,6 см, а неоднородность 10^{-5} - размером 4,1 см, что примерно на 20% меньше расчетных.

Расхождение можно объяснить большими реальными погрешностями изготовления катушки по сравнению с заданными.

Описанная магнитная система использовалась для калибровки гальваномагниторекомбинационных преобразователей [7], а также для определения чувствительности квадрупольного индукционного датчика к дипольной компоненте [8]. Она может быть рекомендована также для калибровки других типов преобразователей величины магнитного поля в электрический сигнал,

работающих в области малых магнитных полей, например, феррозондов, магнитотранзисторов, магнитодиодов, магнитоуправляемых контактов, а также для настройки градиентометров, работающих на средних индукциях магнитного поля.

Путем инвертирования тока в обмотках катушки легко определяется влияние магнитного поля Земли на исследуемый преобразователь. Катушка позволяет создавать как стационарное магнитное поле величиной до 60 Э, так и динамическое со скоростью нарастания 50 кЭ/с при максимальной величине 1 кЭ.

В заключение авторы выражают благодарность Л.П.Зиновьеву за интерес к работе и полезные обсуждения, а также В.Н.Кузнецову и А.А.Анашину за участие в изготовлении катушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bloom A.L. et al. Journ.Appl.Phys., 1965, v.36, p.2560.
2. Garrett M.W. Journ.Appl.Phys., 1967, v.38, p.2563.
3. Garrett M.W., Pissanetzky S. Journ.Appl.Phys., 1971, v.42, p.840.
4. Fanselau G. Abhandlungen des Geomagnetischen Instituts und Observatoriums, Potsdam-Niemegk, Nr.19, 1956. Akademik-Verlag-Berlin.
5. Franzen W. Rev.Sci.Instr., 1962, v.33, p.933.
6. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, 13-11855, Дубна, 1978.
7. Воеводин М.А. и др. ПТЭ, 1978, №6, с.143.
8. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12378, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 октября 1979 года.