

сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

4563/2-80

22/9-80

P9-80-432

М.А. Воеводин, А.Д. Коваленко

ИССЛЕДОВАНИЕ
ДВУМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
К МАГНИТНОМУ ПОЛЮ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАТУШЕК

1980

Воеводин М.А., Коваленко А.Д.

P9-80-432

Исследование двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. 3. Определение чувствительности к магнитному полю измерительных катушек

Рассматриваются вопросы, связанные с определением коэффициентов чувствительности к гармоникам магнитного поля измерительных индукционных катушек. Описана методика, позволяющая повысить точность определения коэффициентов чувствительности, основанная на использовании данных калибровки в дипольном и квадрупольном полях для уточнения геометрических параметров катушек. Приведены результаты практического использования данной методики на примере индукционных измерительных катушек, предназначенных для исследования характеристик магнитного поля в дипольных магнитах.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Voevodin M.A., Kovalenko A.D.

P9-80-432

Study of Two-Dimensional Magnetic Fields Using a Harmonic Analysis Method. 3. Determination

Определение с высокой точностью величин коэффициентов чувствительности реальных измерительных индукционных катушек /ИК/ к требуемому набору гармоник магнитного поля /МП/ является важной задачей в организации магнитных измерений, от успешного решения которой зависит в итоге точность измерений.

В данной работе рассматриваются некоторые методические возможности повышения точности при определении коэффициентов чувствительности ИК, возбуждаемых азимутальной составляющей поля, на примере реальной аппаратуры и устройств, разработанных для экспериментального исследования МП в сверхпроводящих магнитах типа "оконная рама" /1/.

Амплитуда n -й гармоники МП при измерениях с интегратором может быть выражена /в системе единиц СИ/ следующим образом*:

$$B_n(r) = \tau U_n k_n \left(\frac{r}{R_1}\right)^{n-1} \cdot n, \quad /1/$$

где

$$k_n = \frac{1}{\ell w \bar{R}_1 f(\kappa, n)} \quad /2/$$

k_n - коэффициент чувствительности ИК к n -й гармонике МП, U_n - амплитуда n -й гармоники выходного напряжения интегратора, ℓ , w - продольная длина и число витков ИК, \bar{R}_1 - радиальная координата центра сечения внешней обмотки ИК, τ - постоянная времени интегратора, $f(\kappa, n)$ - функция, конкретный вид и величина которой определяются типом катушки и ее геометрическими параметрами /2,3/.

Таким образом, зная геометрические параметры ИК, можно рассчитать коэффициенты k_n и тем самым определить величины B_n .

Если осуществляется предварительная калибровка ИК в устройстве, генерирующем отдельные гармоники МП с заранее известными амплитудами, например, в мультипольной магнитной мере /МММ/ /4/, то

$$k_n = \frac{1}{\tau \cdot n} \frac{B_{0n}}{U_{0n}} \left(\frac{\bar{R}_1}{a}\right)^{n-1}, \quad /3/$$

* Если продольная длина ИК больше длины магнита, то $B_n = B_n \cdot \ell / \ell_e$ / ℓ_e - эффективная длина магнита/.

где B_{0n} - амплитуда основной гармоники поля МММ на радиусе ее магнитной апертуры a , U_{0n} - выходное напряжение интегратора при калибровке.

Величины гармоник МП в случае использования одной и той же электронной аппаратуры при калибровке ИК и измерениях определяются как

$$B_n(r) = B_{0n} \frac{U_n}{U_{0n}} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \quad /4/$$

Сравнивая /1/, /2/ и /3/, /4/, видим, что определение коэффициентов чувствительности ИК к гармоникам /и самих гармоник в конечном итоге/ с использованием калибровки в МММ является наиболее точным, поскольку из рассмотрения исключается ряд геометрических параметров ИК, неопределенность величины которых вносит основную погрешность.

Однако, если \bar{R}_1/a существенно меньше единицы, то величина сигнала U_{0n} может, начиная с некоторого $n \geq n_c$, оказаться ниже уровня шумов электронной аппаратуры, и тем самым возможности калибровки будут ограничены.

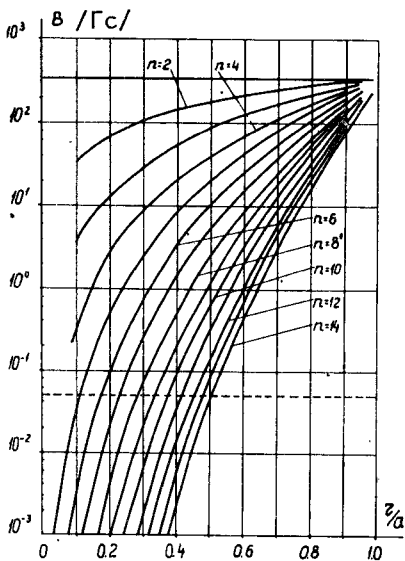


Рис. 1. Зависимость величины гармоник магнитного поля МММ от радиуса.

когда $\bar{R}_1/a \equiv \rho$ гораздо меньше единицы. В частности, в нашем случае имела место необходимость калибровки катушек, для кото-

На рис. 1 представлено изменение амплитуды поля первых четырнадцати гармоник в зависимости от радиальной координаты. В качестве максимального поля взята величина 0,033 Т, примерно соответствующая амплитудам этих гармоник при $r=a$ и токе питания $I=110$ А для МММ, описанной в работе /4/. Зная возможности электронной аппаратуры и примерные параметры измерительной катушки, можно, пользуясь рис. 1, заранее оценить n_c .

Стремление сделать универсальной МММ приводит к тому, что ее апертура делается достаточной для помещения ИК наибольшего диаметра в соответствии с подлежащими исследованию магнитными элементами, поэтому на практике возникает ситуация,

рых $\rho \approx 0,30$, что с учетом остальных факторов ограничивало возможность их калибровки с точностью не хуже 10% шестой гармоникой.

Катушки предназначались для измерения нелинейности магнитного поля и эффективной длины дипольных магнитов и представляли собой две пары обмоток, первая длиной $l_g = 595,0 \pm 0,2$ мм, а вторая - $l_k = 181,6 \pm 0,2$ мм, конструктивно закрепленных на одном каркасе /рис. 2/. Количество витков в катушках первой пары $w_g = 2 \times 250$, а второй $w_k = 2 \times 300$. Катушки, расположенные на меньшем радиусе, служат для компенсации чувствительности к первой гармонике. Измеренные с помощью механических измерительных приспособлений геометрические параметры катушек, указанные на рис. 3, оказались следующими:

короткие катушки: $\bar{R}_{1k} = 22,3 \pm 0,4$ мм, $\bar{R}_{2k} = 12,6 \pm 0,4$ мм, $\bar{R}_{3k} = 10,2 \pm 0,4$ мм, $\bar{R}_{4k} = 1,75 \pm 0,4$ мм, $2B_k = 1,9$ мм, $2A_k = 4,1$ мм;

длинные катушки: $\bar{R}_{1g} = 23,6 \pm 0,4$ мм, $\bar{R}_{2g} = 13,9 \pm 0,4$ мм, $\bar{R}_{3g} = 12,0 \pm 0,4$ мм, $\bar{R}_{4g} = 4,4 \pm 0,4$ мм, $2B_g = 1,9$ мм, $2A_g = 3,8$ мм.

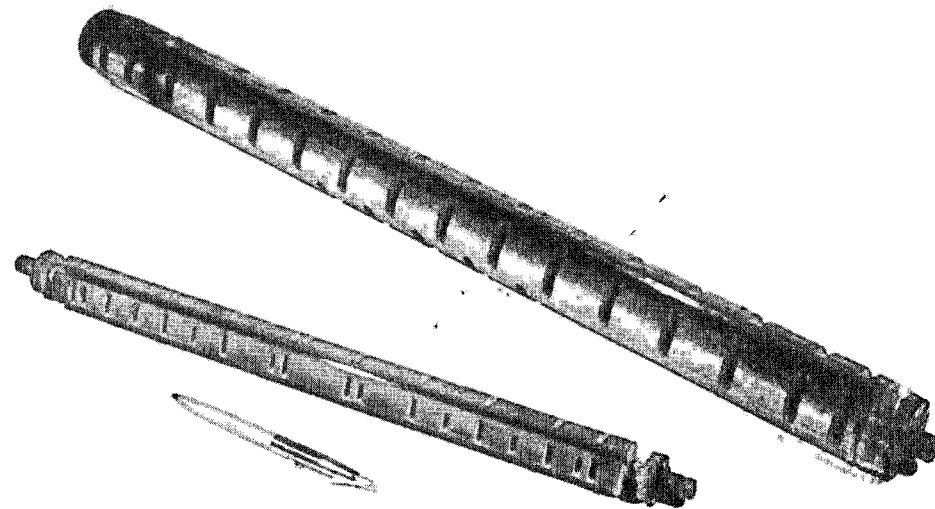


Рис. 2. Общий вид индукционных катушек.

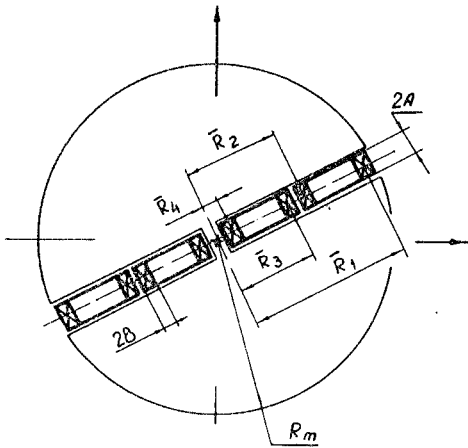


Рис.3. Схематичный поперечный разрез измерительной ИК.

Для больших n относительная погрешность расчетных значений k_n будет примерно равна $\pm 1,5\%$, а погрешность в величине B_n , определяемая как

$$\frac{\delta B_n}{B_n} \approx n \frac{\delta \bar{R}_1}{\bar{R}_1}, \quad /5/$$

в нашем примере составит $\sim 20\%$ для $n=13$. Обеспечение суммарной погрешности измерения нелинейности $\leq 10^{-4}$ на радиусе $0,9 R_m$ при этом уже невозможно.

Для более точного определения геометрических параметров катушек были использованы данные калибровки в дипольном и квадрупольном полях МММ. Эффективная радиальная ширина каждой катушки находилась как

$$\bar{d}_i = \left(\frac{r U_{01}}{w \ell} \right)_i \frac{1}{B_{01}}, \quad /6/$$

а радиальные координаты \bar{R}_{1k} , \bar{R}_{3k} , \bar{R}_{1g} , \bar{R}_{3g} , условно обозначенные через $(R)_i$, как

$$(R)_i = \frac{1}{2} \bar{d}_i + \frac{B_{01}}{B_{02}} \cdot \left(\frac{U_{02}}{U_{01}} \right)_i \cdot a^*, \quad /7/$$

Полученные таким образом значения геометрических параметров катушек можно дополнительно уточнить, если сравнить рассчитанные величины коэффициентов k_n с измеренными при $1 \leq n \leq 6$ в МММ. Отметим также, что если амплитуды дипольного и квадрупольного полей контролировать образцовыми катушками, то погрешности в определении \bar{d}_i и \bar{R}_i можно уменьшить. Учет основных источников погрешностей приводит в нашем случае к относительным ошибкам $\delta \bar{d}_i / \bar{d}_i \approx \pm 0,15\%$ и $\pm 0,22\%$ для длинной и короткой катушек соответственно.

*Выражение /7/ справедливо, если используется одна и та же электронная аппаратура.

Значения радиальных координат, определенные в соответствии с изложенной методикой, оказались следующими: длинные катушки:

$$\bar{R}_{1g} = /23,45 \pm 0,15/ \text{ мм}, \quad \bar{R}_{2g} = /13,6 \pm 0,15/ \text{ мм}, \quad \bar{R}_{3g} = /11,8 \pm 0,2/ \text{ мм},$$

$$\bar{R}_{4g} = /2,0 \pm 0,2/ \text{ мм}; \quad \text{короткие катушки: } \bar{R}_{1k} = /22,6 \pm 0,15/ \text{ мм},$$

$$\bar{R}_{2k} = /12,7 \pm 0,15/ \text{ мм}, \quad \bar{R}_{3k} = /10,8 \pm 0,3/ \text{ мм},$$

$$\bar{R}_{4k} = /1,0 \pm 0,3/ \text{ мм}.$$

Рассчитанные по этим данным величины k_n , а также полученные экспериментально при калибровке в МММ значения $(k_n)_l$ представлены на рис.4.



Рис.4. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов: 1,3 - расчетные величины k_n для короткой и длинной катушек с учетом величины сечения обмоток, 2 - короткая катушка при $F_m = 0$.

При расчете коэффициентов чувствительности функция $f(\kappa, n)$ бралась в виде

$$f(\kappa, n) = (1 - \kappa_1^n) G_1 - \kappa_2^n (1 - \kappa_2^n) G_2, \quad /8/$$

где

$$(G)_{1,2} = 1 + \sum_{m=1}^3 (F_m)_{1,2},$$

$$(F_m)_{1,2} = \frac{C_n^{2m+1}}{n - 2m} \frac{1 - (\kappa^{n-2m})_{1,2}}{1 - (\kappa^n)_{1,2}} \sum_{k=0}^m \frac{(-1)^k C_{2m+1}^{2k+1}}{[2(m-k)+1]} (\xi_0)_{1,2}^{2(m-k)} (\eta_0)_{1,2}^{2k},$$

$$(\xi_0)_{1,2} = \left(\frac{B}{R_1} \right)_{1,2}, \quad (\eta_0)_{1,2} = \left(\frac{A}{R_1} \right)_{1,2},$$

$$\kappa_1 = \frac{\bar{R}_2}{\bar{R}_1}, \quad \kappa_2 = \frac{\bar{R}_4}{\bar{R}_3}, \quad \kappa_3 = \frac{\bar{R}_3}{\bar{R}_1}.$$

Коэффициенты F_m учитывают влияние на чувствительность величины сечения обмотки катушек. Результаты расчета k_n в случае $F_m=0$ для короткой катушки показаны на рис. 4 пунктиром.

Таким образом, изложенная методика позволяет достаточно точно определить коэффициенты чувствительности, даже не проводя калибровку катушек по всем гармоникам в МММ. Кроме того, этим способом мы определяем /и наиболее точно/ усредненные по длине значения радиальных координат и эффективную ширину катушек, что при неравномерной намотке катушек практически невозможно сделать другими способами.

В заключение отметим, что результаты данной работы могут быть наиболее полезны в случае определения чувствительности "толстых" катушек с небольшими радиальными размерами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аверичев С.А. и др. ОИЯИ, Р8-11700, Дубна, 1978.
2. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12378, Дубна, 1979.
3. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-80-393, Дубна, 1980.
4. Воеводин М.А. и др. ОИЯИ, Р9-12687, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июня 1980 года.

Нет ли пробелов в Вашей библиотеке?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д1,2-8405	Труды IV Международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варна, 1974.	2 р. 05 к.
Р1,2-8529	Труды Международной школы-семинара молодых ученых. Актуальные проблемы физики элементарных частиц. Сочи, 1974.	2 р. 60 к.
Д6-8846	XIV совещание по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1975.	1 р. 90 к.
Д13-9164	Международное совещание по методике проволочных камер. Дубна, 1975.	4 р. 20 к.
Д1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
Д-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
Д9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
Д2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 1978. /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна 1978.	5 р. 00 к.
Р18-12147	Труды III совещания по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач.	2 р. 20 к.

Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
Р2-12462	Труды V Международного совещания по нелокальным теориям поля. Алушта, 1979.	2 р. 25 к.
Д-12831	Труды Международного симпозиума по фундаментальным проблемам теоретической и математической физики. Дубна, 1979.	4 р. 00 к.
Д-12965	Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Минск, 1979.	3 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1979.	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:

101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79,

издательский отдел Объединенного института ядерных исследований