

5499/2-79



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

B-63

29/12-79

P9 - 12687

М.А. Воеводин, А.Д. Коваленко, Н.А. Коруков,
Ю.И. Тихомиров

МУЛЬТИПОЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ МЕРА
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ
ГАРМОНИЧЕСКИХ ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

1979

P9 - 12687

М. А. Воеводин, А. Д. Коваленко, Н. А. Коруков,
Ю. И. Тихомиров

МУЛЬТИПОЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ МЕРА
ДЛЯ КАЛИБРОВКИ
ГАРМОНИЧЕСКИХ ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Направлено в ПТЭ

Воеводин М.А. и др.

P9 - 12687

Мультипольная магнитная мера для калибровки гармонических индукционных датчиков магнитного поля

Описана мультипольная магнитная мера, предназначенная для калибровки гармонических индукционных датчиков магнитного поля. Устройство состоит из ста двадцати проводников длиной 100 см каждый, равнорасположенных через 3° в пазах плексигласового цилиндра диаметром 150 мм и окруженных стальным экраном диаметром 153 мм. Проводники соединяются последовательно в группы с чередующимся направлением тока. Количество групп и число проводников в них выбираются в зависимости от номера гармоники поля. Величина магнитного поля в диполе при токе в проводниках 60А составляет 200 Э. Для мультиполей более высокого порядка, чем диполь, обеспечивается точность поля лучше 1,0%. Приведены данные экспериментальной проверки устройства.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Voevodin M.A. et al.

P9 - 12687

Multipole Magnetic System for Calibrating Search Coils

A precise multipole magnetic system for calibrating the search coils is described. One hundred and twenty copper wires each 100 cm long are positioned equidistantly with step of 3° along a plexiglass cylinder, which outer diameter is 150 mm, and surrounded by ferromagnetic shield. The wires are connected in series in several groups with alternate current directions. The amount of groups and wires in them are chosen in accordance with field harmonic to be generated. For multipoles higher than dipole the accuracy of field better than 1 per cent is realized. The maximum magnitude of field in dipole is equal approximately to 200 Oe under current amplitude of about 60A. The results of experimental test of the arrangement are presented.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Одним из факторов, повышающих точность измерений при экспериментальных исследованиях двумерных магнитных полей методом гармонического анализа /1-3/, является чувствительность преобразующего элемента /датчика/ к гармоникам магнитного поля. Различные типы используемых обычно в качестве датчиков индукционных катушек рассмотрены в работе /4/. Стремление получить бóльшую чувствительность приводит к необходимости изготавливать многовитковые датчики, а это снижает точность их расчета вследствие неизбежно возникающей неконтролируемости ряда геометрических параметров. Для калибровки индукционных гармонических катушек необходимо иметь устройство, которое генерировало бы "чистые" гармоники магнитного поля с известными амплитудами и фазами. Такое устройство - мультипольная мера - было рассчитано и изготовлено в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Основным требованием, предъявляемым к нему, являлась возможность генерации первых 10 гармоник, амплитуды которых были бы известны с точностью ~5%.

1. УСТРОЙСТВО И АНАЛИЗ ПОЛЕЙ МЕРЫ

Мультипольная магнитная мера составлена из 120 проводников длиной 100 см, равнорасположенных через 3° вдоль образующих цилиндра радиусом a_1 и помещенных в магнитный экран из стали. Внутренний радиус экрана $b = 76,5$ мм. Для формирования желаемой гармоники магнитного поля проводники соединяются последовательно в группы /"полюса"/ с чередующимся направлением тока. Количество групп $2p$ ($p = 1, 2, \dots, 60$) и количество проводников в группе m_0 выбираются в зависимости от номера формируемой гармоники N . Пользуясь соотношениями, приведенными в /5/, можно получить выражение для магнитного поля такой системы:

$$|B(r)| = 8 \cdot 10^{-7} \cdot \xi_0 \cdot I \cdot \frac{p \cdot \Delta a}{Ns} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} R_N \left(\frac{r}{a_1} \right)^{N-1} \cdot \sin N\theta, \quad /1/$$

где

$$R_N = (1 + N\Delta a/a_1)^{-1} + \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \left(\frac{a_1}{b}\right)^{2N},$$

Δa , s - радиальный размер и площадь проводника; $\xi_0 \leq 1$ - коэффициент азимутальной плотности проводников; $\theta^\circ = (m_0/2) \cdot 3^\circ$; I - ток в проводниках; $N = p(2k + 1)$; $k = 0, 1, \dots$; μ - магнитная проницаемость экрана.

Выражение /1/ справедливо при азимутально-симметричном распределении токов, то есть в случае, когда число проводников кратно требуемому количеству полюсов. В противном случае магнитное поле можно рассчитать, исходя из заданного азимутального распределения тока $j(\phi)$. При этом векторный потенциал поля будет равен:

$$A_z(r, \phi) = 8 \cdot 10^{-7} \xi_1 \cdot I \cdot \frac{p\Delta a}{Ns} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_1}{n} R_n \left(\frac{r}{a_1}\right)^n (\alpha_n \cos n\phi + \beta_n \sin n\phi).$$

Коэффициенты α_n, β_n определяются из разложения $j(\phi)$ в ряд Фурье, ξ_1 - нормировочный коэффициент, зависящий от общего числа проводников m и количества точек t задания функции $j(\phi)$.

С целью выбора оптимальной величины t были проделаны расчеты гармонических спектров четырнадцатиполюсника при $t = 120, 360, 720$. Отличие в амплитуде седьмой гармоники, рассчитанной по 120 и 360 точкам, не превышает 0,44% и 0,2% соответственно по отношению к данным, полученным при $t = 720$. Для двадцать первой гармоники, величина которой на радиусе $r = 0,9 a_1$ составляет 5% от амплитуды седьмой, расхождение увеличивается до 3,4% и 1,7%. Расчеты при $t = 120$ обеспечивают приемлемую точность и требуют, естественно, меньше машинного времени.

При $m = 120$ условия симметрии не могут быть точно выдержаны лишь для $p = 7$ и $p = 9$.

В таблице приведены амплитуды первых девяти гармоник /в Э/А/ на радиусе $r = 0,5 a_1$, рассчитанные для различных вариантов практической реализации четырнадцатиполюсника.

Первая колонка - симметричное распределение / $2\theta = 25,71^\circ$ /. Практически возможно получить $2\theta_1 = 24^\circ$ и $2\theta_2 = 27^\circ$, объединяя в одну группу восемь или девять проводников. Гармонический спектр поля при чередовании групп с $2\theta_1$ и $2\theta_2$ приведен во второй колонке. В остальных колонках группы с чередующимся направлением тока имели одинаковую протяженность $2\theta_1 = 24^\circ$ и отличались различным азимуталь-

ТАБЛИЦА

Схема n	1 (СИММЕТР)	2	3	4	5	5 (КОРРЕКТ)
1	0.0	0.2454	0.0119	0.0106	0.0510	0.0024
2	0.0	0.0	0.0122	0.0009	0.0	0.0
3	0.0	0.0255	0.0097	0.0088	0.0150	0.0063
4	0.0	0.0	0.0074	0.0068	0.0	0.0
5	0.0	0.0074	0.0059	0.0055	0.0064	0.0055
6	0.0	0.0	0.0059	0.0056	0.0	0.0
7	0.0516	0.0525	0.0520	0.0519	0.0522	0.0545
8	0.0	0.0	0.0016	0.0016	0.0	0.0
9	0.0	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003

ным расположением проводников, в которых $I = 0$. В последнем варианте четыре из восьми свободных проводников использованы для подавления дипольной составляющей, при этом ток в корректирующих проводниках $I_k = 0,237I$. Из расчетов следует, что при коррекции седьмая гармоника доминирует до $\gamma \approx 0,4 a_1$ и может быть надежно выделена путём спектрального разложения сигнала с калибруемой катушки, по крайней мере до $\gamma \approx 0,25 a_1$. В остальных вариантах рабочая область меры оказывается меньше. Аналогичная ситуация имеет место и для $p=9$.

На рис. 1 схематично показано поперечное сечение устройства.

Каждый проводник меры набирался из четырех медных проволок $\phi 0,8$ мм, которые запрессовывались в паз плексиглазового каркаса и заливались эпоксидным компаундом. При изготовлении каркаса и пазов гарантировалась точность не хуже 0,05 мм по радиусу и спиральность не более 30". В расчетах проводник моделировался участком цилиндрического слоя толщиной $\Delta a = 0,8$ мм, угловой протяженностью $\phi_0 = 2,4^\circ$ и внутренним радиусом $a_1 = 74,32$ мм. Общий вид устройства показан на рис. 2.

Рис.1. Схематичное изображение устройства: 1 - медные проволоки, составляющие проводник, 2 - плексигласовый цилиндр - каркас, 3 - стальной экран.

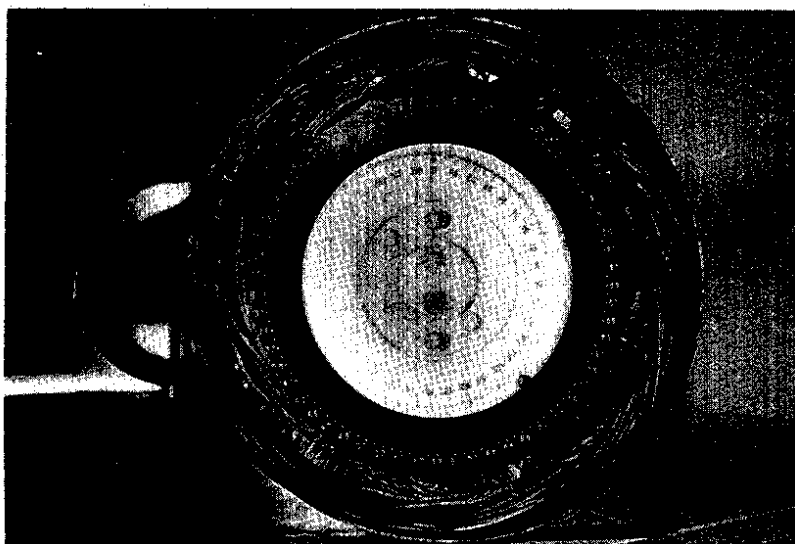
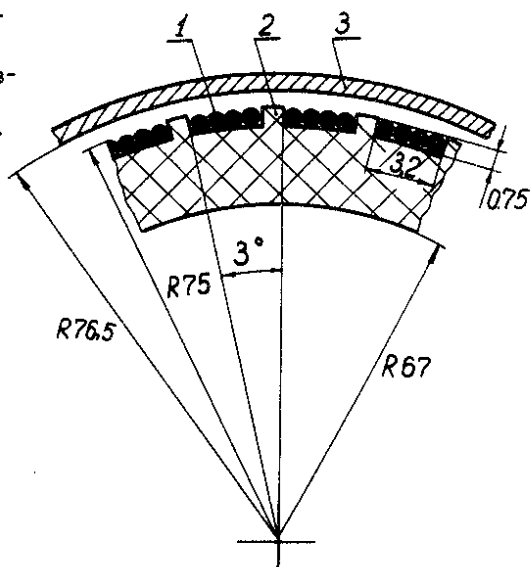


Рис.2. Общий вид мультипольной магнитной меры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Устройство запитывалось от стабилизированного источника импульсного тока длительностью 50 мс с регулируемой крутизной $10,2 \div 5 \cdot 10^8$ А/с. Амплитуду тока можно было изменять в пределах от 10 до 60 А. Источник был собран по схеме емкостного накопителя энергии, разряжающегося на индуктивную нагрузку. Контроль величины тока осуществлялся по сигналу со стандартного шунта /класса точности 0,5/, подключенного к цифровому вольтметру Щ1513. Для повышения точности измерений тока в схеме подключения имеется элемент памяти абсолютной величины мгновенного значения импульсного напряжения.

В процессе измерений было замечено, что зависимость выходного сигнала калибруемой катушки от тока питания меры отличается от линейной на 0,2% при изменении тока от 15 до 30 А. При дальнейшем увеличении тока до 60 А линейность улучшается. Это является следствием изменения магнитной проницаемости экрана.

Из /1/ следует, что отношение амплитуды полей, рассчитанных для конечного μ и для $\mu = \infty$, имеет вид:

$$\eta = 1 - \frac{2}{\mu} \frac{\rho^{2n}}{1 + \rho^{2n}}, \quad /3/$$

где $\rho = a_1/b$. Сравнение расчетных дипольного и квадрупольного полей устройства и измеренных индукционными катушками с известной чувствительностью показало завышение расчетных /при $\mu = \infty$ / значений на 10% и 2,5% соответственно. Размагничивание экрана путем переполюсовки тока перед каждым следующим импульсом уменьшило расхождение до 5% и 0,85%. С увеличением номера гармоники влияние размагничивания уменьшалось.

Таким образом, описанная магнитная система может быть использована для калибровки с точностью $\sim 1\%$ индукционных катушек, используемых для нахождения высоких гармоник при исследовании двумерных магнитных полей методом гармонического анализа. Эта система сравнительно проста в изготовлении и универсальна в смысле возможности генерации достаточно большого набора мультиполей и вариации размеров калибруемых катушек. Для обеспечения лучшей точности при $p=1$ и $p=2$ следует экспериментально уточнять реальные магнитные характеристики экрана. Измерения проводились магнитометром, описанным в работе /6/.

В заключение авторы выражают благодарность Л.П.Зиновьеву за интерес к работе и обсуждения и В.Н.Кузнецову за проведение монтажных работ и помощь в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Греков Н.Н., Рябов А.П., Гольдин Л.Л. ПТЭ, 1956, 2, с.29.
2. Dayton I.E., Shoemaker F.C., Mozly R.F.Rev.Sci.Instr., 1954, 25, p.485.
3. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12233, Дубна, 1979.
4. Воеводин М.А., Коваленко А.Д. ОИЯИ, Р9-12378, Дубна, 1979.
5. Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. "Мир", М., 1976, с. 143.
6. Воеводин М.А., Романов Ю.И., Сайфулин Ш.З. ОИЯИ, 13-11855, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июля 1979 года.