

Г. В. БАДАЛЯН

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ

## В в е д е н и е

Из уравнений Максвелла следует возможность получения постоянных аксиально-симметричных магнитных полей во внутренней полости ферромагнетика. В частности, этому посвящена работа [1].

Поля создаются распределением по определенному закону соленоидальных ампер-витков на внутренней цилиндрической поверхности полого железного цилиндра, имеющего конечную толщину стенок и оснований.

При выбранных различных распределениях ампер-витков можно получить целое семейство постоянных аксиально-симметричных магнитных полей в полости сердечника.

С целью проверки практической эффективности и целесообразности метода, нами были изготовлены лабораторные образцы электромагнитов и проведены подробные исследования топографии магнитных полей.

Образцы магнитов выполнены для получения и исследования 3-х типов полей (см. фиг. 2 работы [1]):

а) однородное поле

$$H_z(r, z) = H_0; \quad (1)$$

б) „колоколообразное“ поле вершиной вверх или вниз

$$H_z(r, z) = H_0 \left[ 1 \pm I_0 \left( \frac{\pi r}{l} \right) \cos \frac{\pi z}{l} \right]; \quad (2)$$

(на продольной оси магнита, т. е. при  $r = 0$  имеем „чистый колокол“);

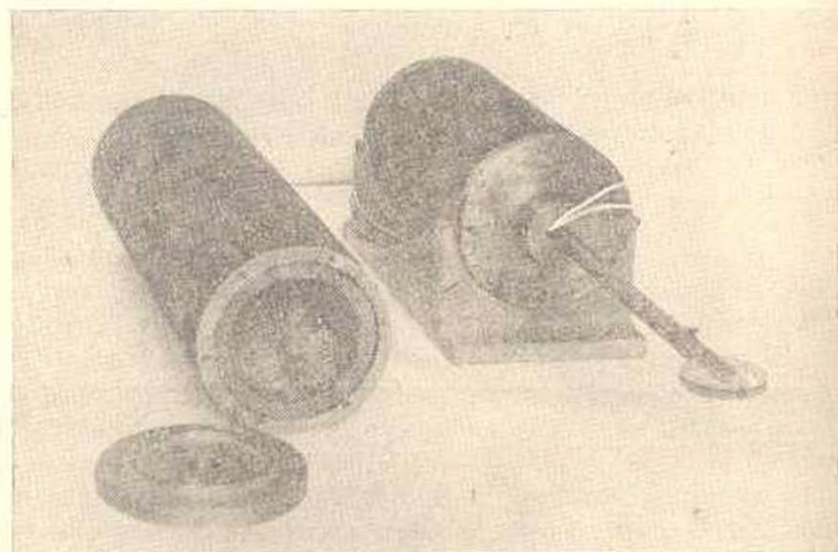
в) косинусоидальное поле

$$H_z(r, z) = H_0 I_0 \left( \frac{2\pi r}{l} \right) \cos \frac{2\pi z}{l}, \quad (3)$$

где  $H_0$  — поле в центре ( $r = 0, z = 0$ ),  $I_0$  — Бесселева функция от мнимого аргумента,  $l$  — полудлина магнитного поля.

Выполнение образцов магнита. Магнитопроводом служила стальная (марка 40Х) труба с внутренним диаметром 112 мм, толщиной стенки 10 мм (фиг. 1). Для получения полей типа а), б) ра-

бочая длина трубы была 23 см, а в случае в) — 40 см. Со стороны оснований магнитопровод закрывался стальными (марка СТ-3) дисками толщиной 14 мм. С целью введения во внутрь магнита измерительного приспособления (а вообще для пропускания через магнитное поле пучка электронов), в торцевых дисках сделаны центральные отверстия  $\varnothing 20$  мм (см. фиг. 1).



Фиг. 1. Общий вид образцов электромагнитов.

Распределенная соленоидальная катушка выполнялась отдельно на изоляционном каркасе с таким расчетом, чтобы после введения во внутрь магнитопровода, она близко прилегала к железу\*. Для обеспечения соосности катушки с магнитопроводом каркас с катушкой одевается при сборке на кольцевые небольшие выступы, имеющиеся на торцевых дисках. Все катушки выполнены из медного провода марки ПБД-0,83. Для улучшения теплоотвода с катушки изоляционный каркас продырявлен по всей боковой поверхности, что создает доступ воздуха к токоведущим проводникам.

Согласно работе [1], закон распределения плотности ампер-витков по длине катушки, необходимый для создания требуемой формы поля  $H_z(r, z)$ , выражается так:

$$n(z') = \frac{1}{0,4\pi} H_z(R, z') \frac{a \times \text{вит}}{\text{см}}, \quad (4)$$

где  $R$  — средний радиус катушки.

\* Изоляционный каркас нужного диаметра изготовлялся в лабораторных условиях из обманной с одной стороны эпоксидной смолы бумаги, которая наматывалась на 8—10 слоев на соответствующей гладкой металлической оправе, и после сушки при комнатной температуре в течение 24 час. приобретала необходимую жесткость.



Для получения поля типа а) выбрано  $H_0 = 45$  эрст. Тогда согласно (1) и (4)

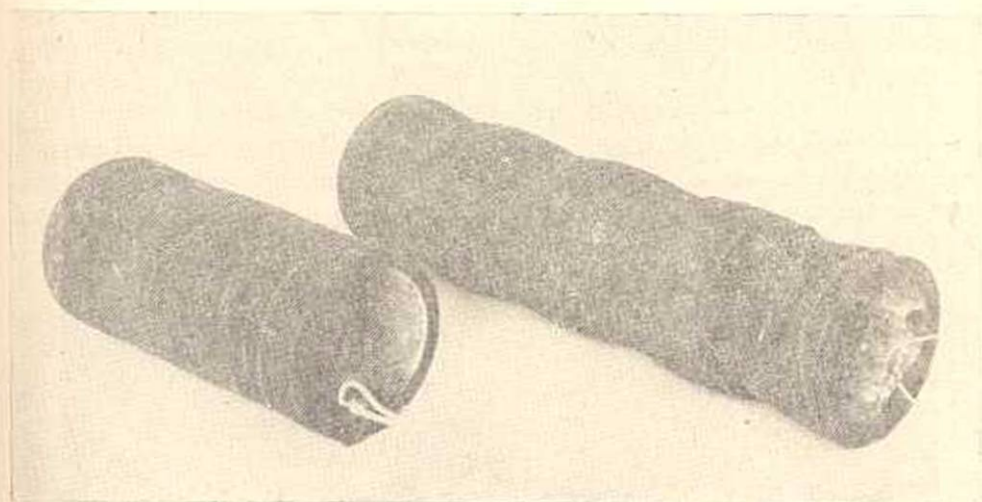
$$n(z') = 36 \frac{a \times \text{вит}}{\text{см}}. \quad (5)$$

При токе питания  $I = 1a$  получается 4-слойная катушка с полным числом витков около 800.

Для получения поля типа б) на катушку образца а) была наложена дополнительная распределенная обмотка при параметрах  $H_0 = 45$  эрст,  $R \approx 5,4$  см. Плотность распределения, согласно (2) и (4),

$$n(z') = \pm 59,5 \cos \frac{\pi z'}{11,5} \frac{a \times \text{вит}}{\text{см}}. \quad (6)$$

При токе питания  $I = 1a$  дополнительно уложено около 860 витков. При изменении направления тока в дополнительной обмотке получим „колоколообразное“ поле вершиной вниз.



Фиг. 2. Катушки с распределенной намоткой.

Наконец, для получения поля типа в) при значениях параметров  $H_0 = 45$  эрст. и  $R \approx 5,2$  см, согласно (3) и (4), нужно

$$n(z') = 64,0 \cos \frac{2\pi z'}{20} \frac{a \times \text{вит}}{\text{см}}. \quad (7)$$

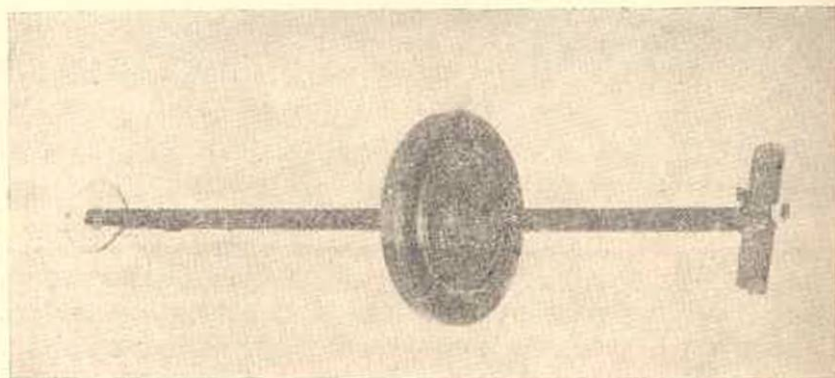
При токе  $I = 1a$  полное число витков катушки составляет около 1610. Намотка распределенных обмоток осуществлялась дискретно, с интервалами по длине 1 см, причем после выполнения каждой ступени последняя закреплялась изолянтной. Подводка питающих проводов катушки после сборки магнита осуществлялась через отверстия в торцах магнитопровода.

Электромагниты питались от стандартного выпрямителя ВС—111. При измерениях ток питания электромагнитов доводился до 1,5а, причем большие токи ограничили тепловым режимом катушки.

Стабильность тока,  $\sim 1\%$ , обеспечивалась феррорезонансным стабилизатором С—0,75 в цепи питания выпрямителя.

**Методика магнитных измерений.** Для магнитных измерений использовались баллистический гальванометр М 21 и сопряженный с ним датчик поля. Последний представлял из себя небольшую плоскую катушку  $\varnothing 7,6 \times \varnothing 6 \times 3,8$  (каркас из орг. стекла), содержащую 2000 витков из провода марки ПЭЛ—0,03. Благодаря применению специально сконструированного приспособления имелась возможность измерять продольную компоненту магнитного поля в различных точках пространства внутри катушки электромагнита.

Изображенное на фиг. 3 приспособление представляет вводимую во внутрь через торцевое отверстие магнита латунную трубку, на внутреннем конце которой закреплена поперечная рейка с четырьмя маленькими роликами и с натянутой на них крепкой нитью. В центре рейки на нити приклеен датчик. На наружном конце трубки на оси установлено небольшое колесико, на которое выведены через трубку и закреплены концы упомянутой нити. Вращением колесика на определенный угол, благодаря перемещению нити, достигается соответствующее радиальное смещение датчика с центрального положения. Осевое же перемещение всей трубки в целом через торцевое отверстие магнита дает возможность устанавливать датчик в различных точках вдоль длины магнита.



Фиг. 3. Измерительное приспособление с датчиком поля.

Точность относительных магнитных измерений определяется точностью отсчета на шкале гальванометра (абсолютная ошибка  $\sim \pm 0,5$  м.и), стабильностью тока питания и величиной самих отбросов и числом измерений (мы повторяли измерения по 4 и больше раз). В случае образца а) отбросы гальванометра близки друг другу



(54—59) мм, и соответствующая средне-квадратичная ошибка составляет  $\leq 1\%$ . В случае же образцов б), в), величины отбросов меняются в широких пределах (от 3—4 мм до 118 мм) и поэтому относительная точность измерений будет различна в различных местах снятых экспериментальных распределений поля, начиная от  $\leq 1\%$  при больших отбросах до  $\leq 10\%$  при малых отбросах.

**Результаты измерений.** Программа магнитных измерений включала следующее:

1) снятие осевого распределения  $H_z$ -компоненты магнитного поля в 3-х образцах магнитов;

2) снятие радиального распределения  $H_z$ -компоненты поля как в центральном поперечном сечении магнитов, так и в сечении вблизи торца;

3) проверка влияния отверстий в торцевых дисках, конечной толщины распределенной обмотки и других факторов на распределение поля в магнитах.

На фиг. 4—5 приведены результаты измерений магнитных полей всех 3-х образцов магнитов а), б), в) по намеченной программе, причем дальние торцы были закрыты дисками без отверстий\*. На тех же графиках приведены для сравнения теоретически ожидаемые распределения согласно формулам (1)—(3).

Видно, что как однородное поле, так и „колоколообразное“ или косинусоидальное поля экспериментально хорошо выявлены.

Рассмотрение экспериментальных данных в пределах точности относительных измерений, показывает близкое согласие экспериментальных и расчетных распределений.

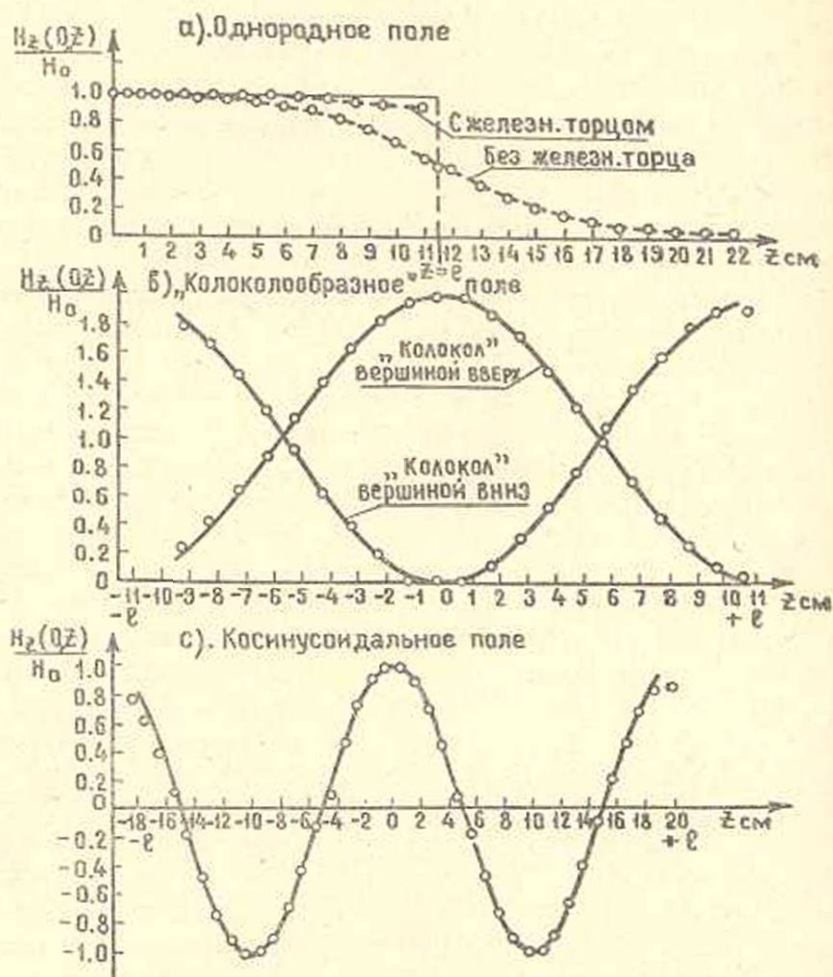
Однако, как это видно на графиках, наблюдается некоторое занижение поля до 7—8% в областях, приближающихся к торцам. Проведенное подробное исследование возможных причин показало, что наблюденное занижение поля к торцам обусловлено, по всей вероятности, неточным соблюдением основных предпосылок задачи: магнитная проницаемость сердечника бесконечна, а также распределенные ампер-витки имеют конечную радиальную толщину, составляющую около  $\frac{1}{6}$  часть внутреннего радиуса сердечника. Дополни-

тельно отметим, что наличие „пассивных“ зон до 2—3 мм между стальным торцом и краем распределенной катушки увеличивает вышеупомянутое занижение поля у торцов вплоть до 10%.

Проверка влияния торцевых отверстий на картину поля осуществлялась повторением всего цикла измерений для позиции, когда торцевые диски имеют отверстия. В результате оказалось, что в пределах ошибок измерений картины поля совпадают с теми, которые имелись при отсутствии отверстия, за исключением области поля, не-

\* Ввиду конструктивных особенностей измерительного приспособления, датчик не доходил до стенки дальнего торца на 0,5 см и до стенки ближнего торца на 1,5 см.

посредственно прилегающей к отверстию. Здесь, на отрезке 15—20 мм (область порядка диаметра отверстия) наблюдается более резкое занижение поля вплоть до 34—35% (сравни с 7—8% при отсутствии отверстия).

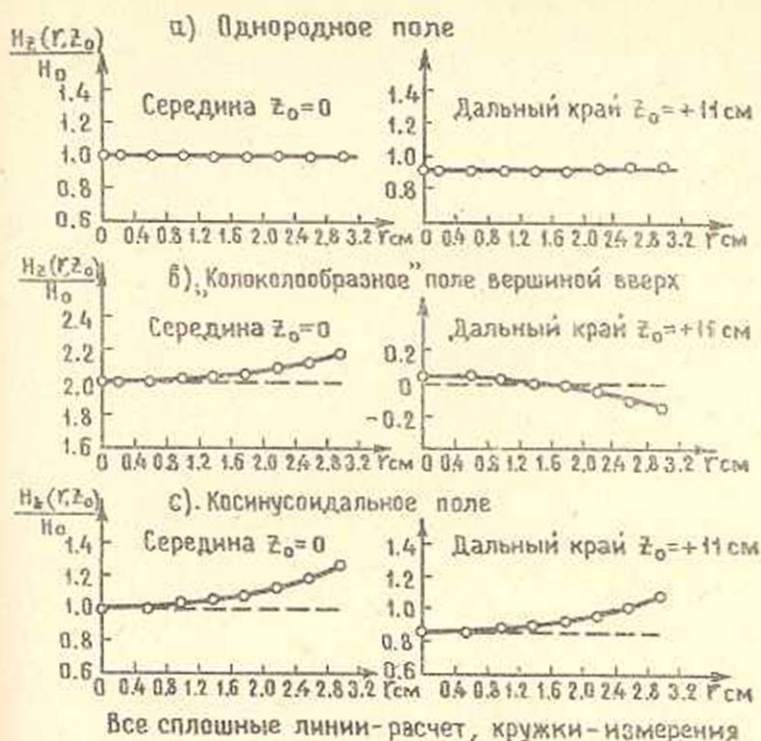


Фиг. 4. Распределение  $H_z$ -компоненты поля вдоль оси электромагнитов.

На фиг. 4а изображено осевое распределение поля, снятое при отсутствии торцевого диска вообще. Видно как сильно падает поле по сравнению со случаем, когда имеется железный торец.

Таким образом, результаты опытной проверки показывают хорошую близость измеренных топографий полей к расчетным, и, если учесть отсутствие каких-либо существенных трудностей в изготовлении этих магнитов, то по-видимому они не лишены практического интереса.





Фиг. 5. Распределение  $H_z$ -компоненты поля по радиусу электромагнитов.

В заключение автор выражает благодарность А. А. Азатяну, Ф. Ц. Кечяну и Г. С. Айрапетяну за помощь при изготовлении магнитов и проведении измерений.

Физический институт  
ГКАЭ

Поступила 31 III 1964

Հ. Վ. ՔԱԳԱՅԱՆ

ՏՎՅԱԼ ՉԵՎԻ ԱՔՍԻԱԼ-ՍԻՄԵՏՐԻԿ ՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ  
ՍՏԱՅՄԱՆ ՌԻՍՈՒՄԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆ

Ա Վ Փ Ն Փ Ն Վ

Աշխատության մեջ կատարված է փակ ֆերրոմագնիսական սիստեմում ալյալ ձևի աքսիալ-սիմետրիկ հատաստուն մագնիսական դաշտերի ստացման էքսպերիմենտալ հետազոտություն:

Պատրաստված լաբորատորային էլեկտրամագնիսների միջոցով ստացվել են համասեռ, «դանդանման» ու կոսինուսային դաշտեր և շափվել են նրանց տարածական բաշխումները:

էքսպերիմենտալ և տեսականորեն սպասվող դաշտերի բաշխումների հա-

մեծատուճր տալիս է լավ համընկնում, բացառությամբ այն տիրույթների, որոնք մասնւում են մագնիսների եզրերին. այստեղ դիտւում է դաշտի լարվածության փոքր ինչ իջեցում (մինչև 7—8%):

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бадалян Г. В. Получение постоянных аксиально-симметричных магнитных полей в ферромагнитной системе. Известия АН АрмССР, сер. физ.-мат. наук, 17, № 5, стр. 121, 1964.