

Научная статья
УДК 621.318
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.005

ЭКВИВАЛЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА МИ-1201ИГ

Никита Игоревич Лазарев¹, Виталий Валентинович Колобов²

^{1,2}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹n.lazarev@ksc.ru

²v.kolobov@ksc.ru

Аннотация

Представлена разработка эквивалента магнитной системы, имеющего схожие характеристики с электромагнитом масс-спектрометра МИ-1201ИГ. Этот эквивалент предназначен для настройки электронных блоков системы магнитной стабилизации масс-спектрометра. С помощью компьютерного моделирования проведены расчёты распределения магнитного поля электромагнита и определены его параметры, критически важные для работы датчиков на эффекте Холла в воздушном зазоре.

Ключевые слова:

электромагнит постоянного тока, магнитная индукция, магнитное поле, датчик Холла

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Лазарев Н. И., Колобов В. В. Эквивалент магнитного поля масс-спектрометра МИ-1201ИГ // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 48–52. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.005.

Original article

THE EQUIVALENT OF THE MAGNETIC FIELD OF A MASS SPECTROMETER MI-1201IG

Nikita I. Lazarev¹, Vitalii V. Kolobov²

^{1,2}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia

¹n.lazarev@ksc.ru

²v.kolobov@ksc.ru

Abstract

This paper presents the development of an equivalent magnetic system that has similar characteristics to the electromagnet mass spectrometer MI-1201IG. This equivalent is intended for tuning the electronic blocks of the magnetic stabilization system of the mass spectrometer. Calculations of the distribution of the magnetic field of the electromagnet are carried out with the help of computer simulation and its parameters are determined, which are critical for the operation of sensors on the Hall effect in the air gap.

Keywords:

DC electromagnet, magnetic induction, magnetic field, Hall sensor

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Lazarev N. I., Kolobov V. V. The equivalent of the magnetic field of a mass spectrometer MI-1201IG // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 48–52. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.005.

Точность измерения и оперативность перехода между массами определяются магнитной системой масс-спектрометра. Часто бывает недостаточно поддерживать ток через электромагнит, изменение магнитного сопротивления отклоняющего магнита может привести к различным значениям его магнитной индукции при одном и том же токе. Причиной варьирования параметров магнита может быть изменение его воздушного зазора и магнитной проницаемости магнитопровода в ходе

эксперимента. Воздушный зазор в системе имеет небольшую величину, незначительное изменение зазора приведёт к значительному изменению индукции в зазоре, чему причинами могут быть нагрев магнитной системы и термические расширения конструкции во время эксперимента. По этой же причине происходит изменение проницаемости магнитопровода, что приводит к тем же последствиям. Второй важной особенностью магнитов является наличие остаточной индукции и коэрцитивной силы.

Широкое распространение в качестве датчиков магнитного поля в масс-спектрометрах получили датчики на эффекте Холла. В современной промышленности используются датчики на эффекте Холла с термокомпенсацией и термостабилизацией. На рис. 1 представлен датчик магнитного поля, применяемый в масс-спектрометре МИ-1201ИГ [1].

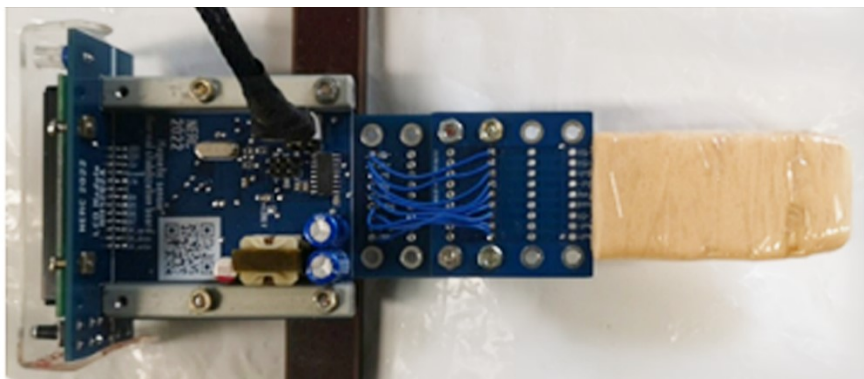


Рис. 1. Датчик магнитного поля

Fig. 1. Magnetic field sensor

Целью данной работы является проектирование электромагнита постоянного тока с воздушным зазором, в который будет помещаться активный элемент измерительной системы. Помимо получения требуемой индукции, необходимо получить качественную картину векторов магнитной индукции в магнитном зазоре, а именно минимальный градиент и минимальное отклонение магнитной индукции. Данные требования необходимы для того, чтобы при настройке электронных блоков масс-спектрометра элементы Холла магнитоизмерительной системы располагались в зоне с малым отклонением магнитной индукции как по вектору, так и по минимальному изменению значения от среднего.

Для проектирования предоставлены следующие необходимые данные. Величина магнитной индукции B — 0,25 Тл при силе тока I , равной 1 А. Активное сопротивление обмотки — 10 Ом, индуктивность обмотки — не менее 1 Гн. В магнитной системе должен иметься воздушный зазор не менее 10 мм. Отклонение значения магнитной индукции от среднего в активной зоне — не более 0,25 %, глубина активной зоны — не менее 10 мм. Требуется определить основные размеры электромагнита и рассчитать обмоточные параметры катушки электромагнита. Также необходимо рассчитать распределение магнитного поля электромагнита постоянного тока.

В результате проведённого анализа магнитопроводов с целью достижения необходимых характеристик остановились на магнитопроводе ПЛ 25×50×120 из холоднокатаной стали марки 3406-08 ГОСТ 21427.1-83 толщиной 0,30–0,35 мм. Данный магнитопровод представляет собой два П-образных элемента, которые собираются в конструкцию без зазора (рис. 2). Для получения воздушного зазора принято установить с одной стороны вставку толщиной 10 мм из такого же материала. Размеры конструкции магнитопровода представлены в табл. 1.

Магнитный поток вычисляем по формуле

$$\Phi = B \cdot S, \quad (1)$$

где B — магнитная индукция; S — площадь поперечного сечения воздушного зазора, через который проходит магнитный поток.

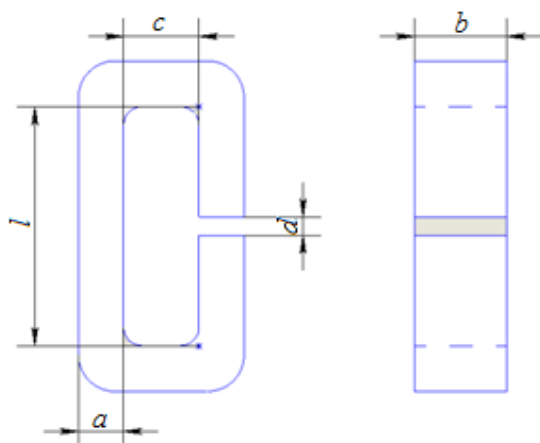


Рис. 2. Геометрические размеры конструкции магнитопровода
Fig. 2. Geometric dimensions of the magnetic core design

Размеры магнитопровода
Magnet core dimensions

Размеры магнитопровода, см				Воздушный зазор, мм
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>l</i>	<i>d</i>
2,45	5	4,1	13	10

Таблица 1

Магнитное сопротивление магнитопровода и воздушного зазора соответственно:

$$R_m = \frac{l}{S \cdot \mu_0 \cdot \mu}, \quad (2)$$

и

$$R_{\text{зазор}} = \frac{d}{S \cdot \mu_0}, \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость материала цепи.

Магнитодвижущая сила представляет собою произведение магнитного потока и магнитного сопротивления:

$$F = \Phi (R_m + R_{\text{зазор}}). \quad (4)$$

Число витков:

$$w = \frac{F}{I}. \quad (5)$$

Магнитная проводимость воздушного зазора:

$$G = \mu_0 \frac{S}{d}. \quad (6)$$

Рассчитываем проводимость потока рассеяния:

$$G_{\sigma} = \mu_0 \frac{l \cdot b}{c}. \quad (7)$$

Для того чтобы получить действительную величину потока рассеяния, проводимость рассеяния берётся приведённой. Значение проводимости рассеяния, приведённой по потоку:

$$G_{\sigma 2} = \frac{G_{\sigma}}{2}. \quad (8)$$

Индуктивность катушки определяется как

$$L = (G + G_{\sigma 2}) w^2. \quad (9)$$

Результаты расчёта

Φ	$3,0625 \cdot 10^{-4}$ Вб
R_m	41 649 А/Вб
$R_{\text{зазор}}$	6 478 781 А/Вб
F	1997 А
w	1997
L	1 Гн

Обмотка катушки выполнялась изолированным проводом $D = 1,06$ мм. Активное сопротивление обмотки рассчитывается по формуле

$$R = l_{\text{cp}} \frac{w}{2} \cdot \frac{\rho_m}{S}, \quad (10)$$

где l_{cp} — средняя длина витка; ρ_m — удельное сопротивление меди.

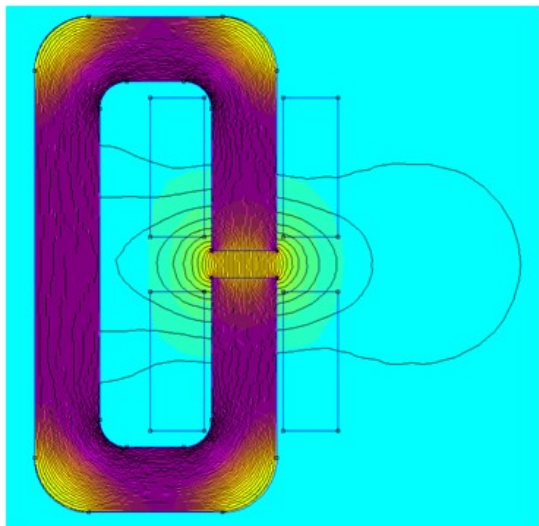


Рис. 3. Распределение магнитного поля
Fig. 3. Magnetic field distribution

Для уменьшения потока, выходящего вне воздушного зазора, катушку разбили на две равные части и расположили в непосредственной близости у зазора. Таким образом, сопротивление R каждой из катушек 5 Ом и при последовательном соединении мы получаем необходимую величину активного сопротивления.

Любой постоянный магнит представляет собой источник магнитного поля с распределёнными параметрами. К расчёту магнитных систем при компьютерном моделировании применяют метод конечных элементов [2, 3]. Для аналитического расчёта использовалась программа FEMM 4.2. Прежде чем начать расчёт магнита, необходимо создать модель, которая будет состоять из опорных точек. После ввода всех опорных точек необходимо соединить их отрезками прямых линий или дуг, для того чтобы модель приняла законченный вид. После того как модель создана, необходимо задать свойства каждого из этих блоков и граничные условия [4].

Когда свойства модели и граничные условия заданы, можно строить сетку конечных элементов и производить расчёт модели. Распределение магнитного поля представлено на рис. 3.

Результаты расчёта магнитной составляющей B в воздушном зазоре представлены на рис. 4. В нашем случае необходимо получить однородность поля при уровне магнитной индукции 0,25 Тл. Неоднородность магнитного поля в воздушном зазоре составляет 16,14 %. Датчик будет помещён в активной зоне на участке от 7 до 17 мм, неоднородность поля этого участка определяется градиентом поля $\Delta B/l$ 58,7 мкТл/мм. Исходя из формы кривой, можем говорить о равномерности распределения поля в заданной области. Результаты неоднородности поля в воздушном зазоре представлены в табл. 2.

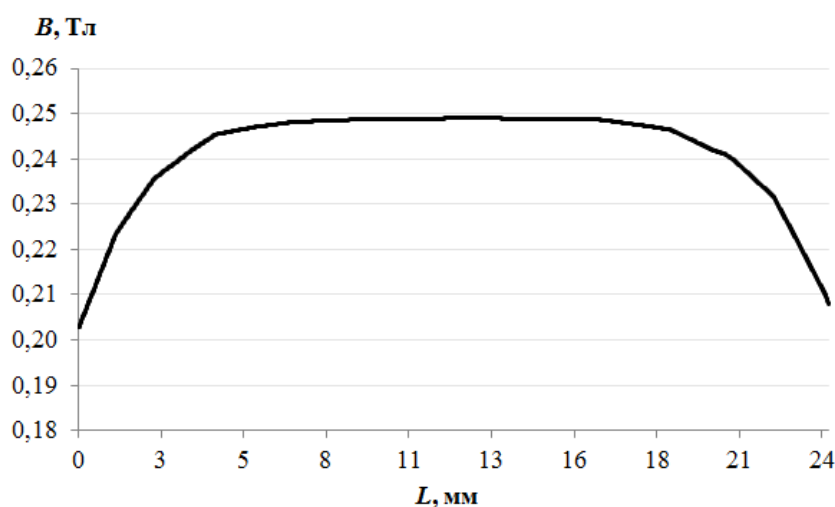


Рис. 4. График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре
Fig. 4. Graph of the magnetic induction distribution in the air gap

Таблица 2

Результаты расчётов неоднородности поля
Results of field inhomogeneity calculations

На всей ширине воздушного зазора (от 0 до 24 мм)			В активной зоне воздушного зазора (от 7 до 17 мм)		
Неоднородность	$\frac{\Delta B}{B_{\text{ср}}}, \%$	16,4	Неоднородность	$\frac{\Delta B}{B_{\text{ср}}}, \%$	0,24
Градиент	$\frac{\Delta B}{l}, \frac{\text{мкТл}}{\text{мм}}$	1625	Градиент	$\frac{\Delta B}{l}, \frac{\text{мкТл}}{\text{мм}}$	58,7

Заключение

Разработанная магнитная система имеет такие же магнитные и электрические характеристики, что и электромагнит масс-спектрометра МИ-1201ИГ. В зазоре магнитной системы, в его средней части, обеспечивается требуемый низкий градиент магнитного поля и его высокая однородность.

Список источников

1. Колобов В. В., Баранник М. Б. Система регулирования и стабилизации магнитного поля // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 5. С. 58–64. doi:10.1134/S0032816219050070. EDN: PCMLGW.
2. Буль О. Б. Методы расчёта магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Academia, 2006. 288 с.
3. Андреева Е. Г., Татевосян А. А., Сёмина И. А. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 110–113. EDN: QBNDMJ.
4. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.

References

1. Kolobov V. V., Barannik M. B. Sistema regulirovaniya i stabilizatsii magnitnogopolya [Magnetic field regulation and stabilization system]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques], 2019, No. 5, pp. 58–64. (In Russ.). doi:10.1134/S0032816219050070. EDN: PCMLGW.
2. Bul' O. B. *Metody raschyota magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Programma ANSYS* [Methods of calculation of magnetic systems of electrical devices. The ANSYS program]. Moscow, Academia, 2006, 288 p.
3. Andreeva E. G., Tatevosyan A. A., Syomina I. A. Issledovanie osesimmetrichnoy modeli magnitnoy sistemy otkrytogo tipa [The investigation of an axially symmetric model of an open-type magnetic system]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2010, No. 1 (87), pp. 110–113. (In Russ.). EDN: QBNDMJ.
4. Kopylov I. P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 327 p.

Информация об авторах

Н. И. Лазарев — инженер;

В. В. Колобов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

N. I. Lazarev — Engineer;

V. V. Kolobov — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.
The article was submitted 12.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.