

Малогабаритные магнитные системы на редкоземельных постоянных магнитах для нейтронных и синхротронных исследований

Представлены результаты разработки двух малогабаритных магнитных систем с амплитудой магнитной индукции в рабочем зазоре 1.4 и 3.2 Тл, превышающей значения остаточной индукции используемого материала постоянных магнитов.

Ключевые слова: постоянный магнит, вектор магнитной индукции, принцип оптимального намагничивания, магнитомягкий материал

По заданию НИЦ Курчатовский институт специалистами нашего предприятия были разработаны и изготовлены две малогабаритные системы, используемые в качестве источников магнитного поля в установках по проведению фундаментальных и прикладных исследований с использованием синхротронного и нейтронного излучений.

Технические требования к проектируемым магнитным системам выглядели следующим образом:

1-я магнитная система в качестве базового прототипа использует магнитную систему, описанную в работе [1] со следующими уточнениями: система должна иметь полюсные наконечники диаметром 10 мм с рабочим зазором между ними 10 мм. Полюсные наконечники должны иметь внутренне сквозное отверстие по оси вращения 5 мм. Внешний диаметр системы не должен превышать 80 мм. Амплитуда магнитной индукции в рабочем зазоре системы должна быть не менее 1.4 Тл при н.у.

2-я магнитная система должна иметь полюсные наконечники диаметром не менее 5 мм с рабочим зазором между ними 0.8 мм. Амплитуда магнитной индукции в рабочем зазоре системы должна быть не менее 3 Тл при н.у. Масса и габариты системы – минимально возможные.

Минимизация массы и габаритов с учетом того, что требуемая напряженность поля в рабочем зазоре превышает значение остаточной индукции материала постоянных магнитов NdFeB, вызывает необходимость использования принципа оптимального намагничивания [2], [3]. Данный принцип описан отечественными авторами ранее известной работы Хальбаха [4].

В качестве примеров построения магнитных схем по этому принципу можно привести схемы гексаполя (рис.1) и магнитной фокусирующей системы технологического гиротрона (рис. 2). В целях упрощения технологии изготовления таких систем, набор направлений текстуры магнитных элементов, чаще всего, ограничен взаимно перпендикулярными и наклоном 45°. Иногда отказываются и от последнего. Характерной особенностью этих схем является то, что требуемое распределение

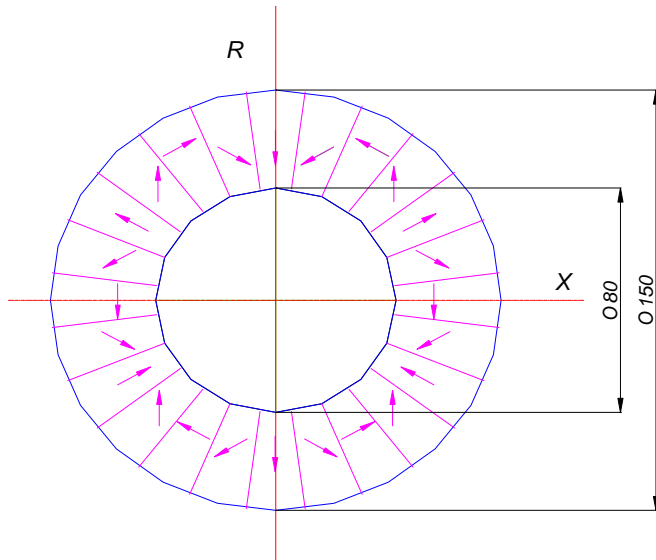


Рисунок 1

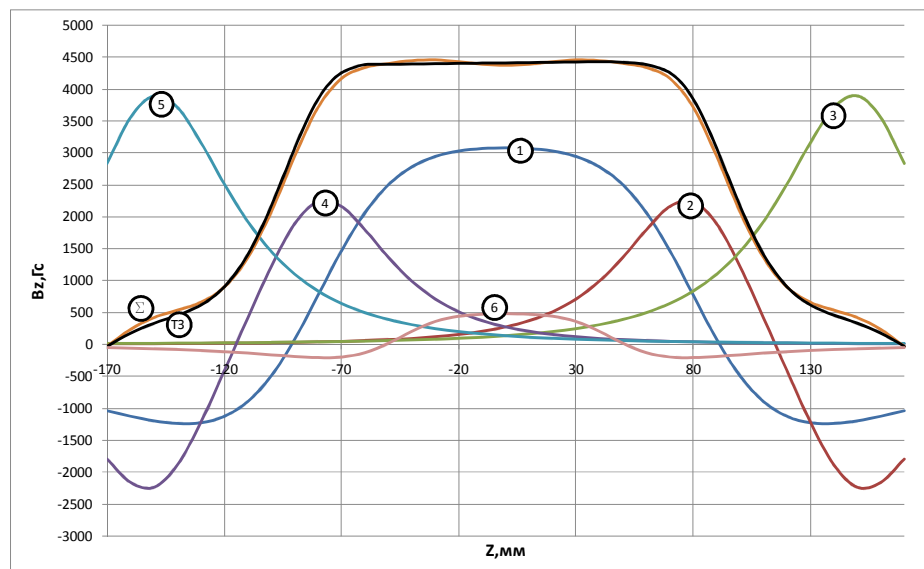
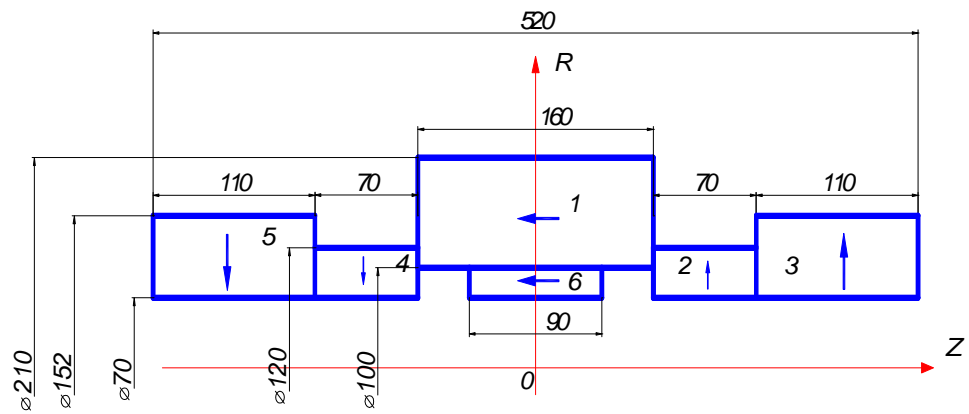


Рисунок 2

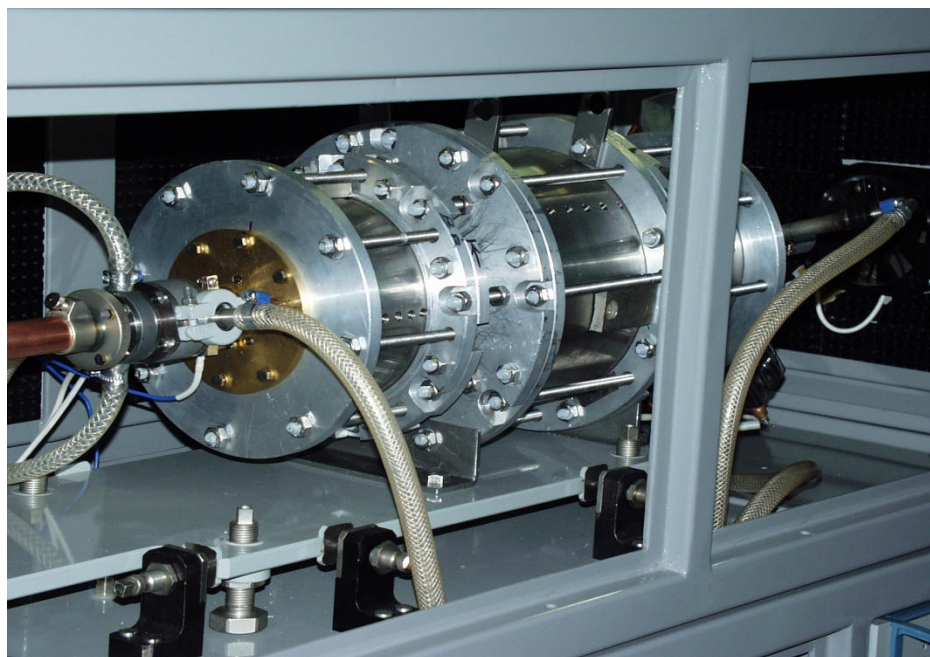


Рисунок 3

магнитной индукции реализуется без магнитомягких элементов. Однако, как показала практика, применение последних в магнитных системах такого типа весьма полезно. Сравнительно недавно коллектив авторов [5] наглядно показал, что для достижения наилучших результатов при проектировании магнитных систем со сложным набором магнитотвердых элементов с различными направлениями и уровнями намагниченности необходимо использовать магнитомягкие элементы. Подробно этот вопрос описан в работе одного из коллектива авторов [6].

Магнитная схема системы с полем более 3 Тл. представлена на Рис. 4

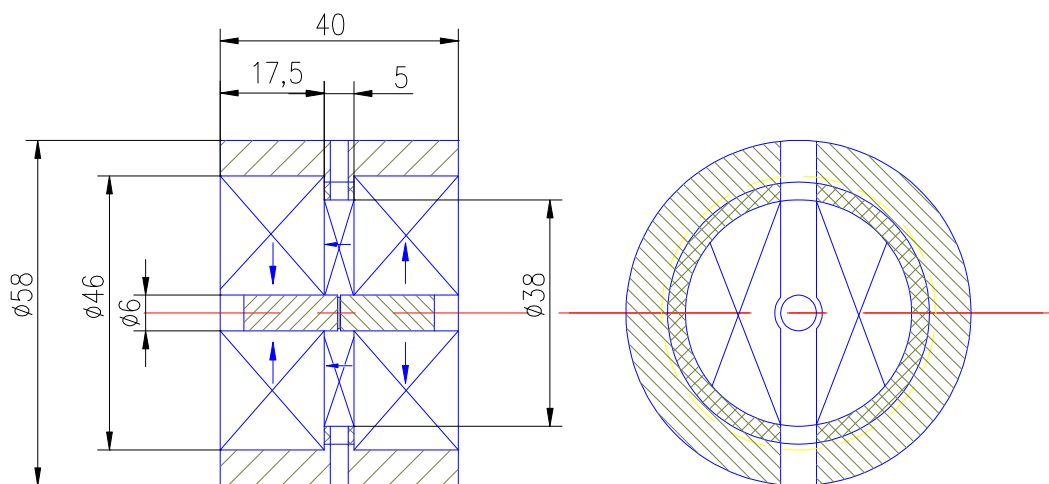


Рисунок 4

Схемы внутренней компоновки магнитных систем приведены на рис.5. Внешний диаметр системы №1 составляет 76 мм, системы №2 60 мм.

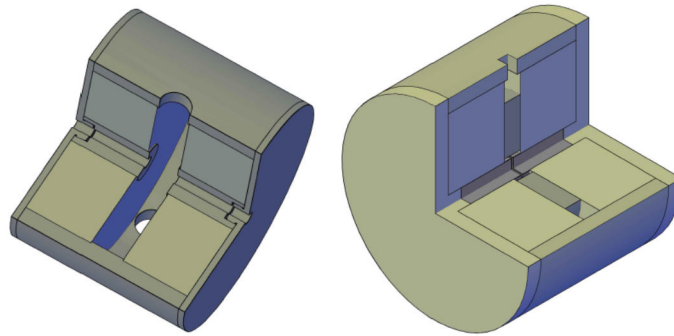


Рисунок 5

В силу того, что требуемые типоразмеры магнитов не входили в стандартную технологическую номенклатуру, постоянные магниты на практике пришлось получать электроэрозионной резкой. В данном процессе неизбежны потери гистерезисных свойств в поверхностных слоях магнитов. На общем падении свойств это сказывается тем в большей степени, чем меньше магниты по размеру, т.к. соотношение объема приповерхностного слоя к общему объему у таких магнитов больше. Так, имея исходный материал магнитов с остаточной индукцией 1.3 Тл, после резки при проведении измерений контрольного параметра обнаружилось падение этого значения до 1.2 Тл. Учитывая этот эффект, в аналитические расчеты магнитных систем закладывались реально достижимые характеристики постоянных магнитов.

Результаты измерений аксиальной составляющей магнитной индукции на оси рабочего зазора магнитной системы №1 в сравнении с расчетными данными приведены на рис. 6.

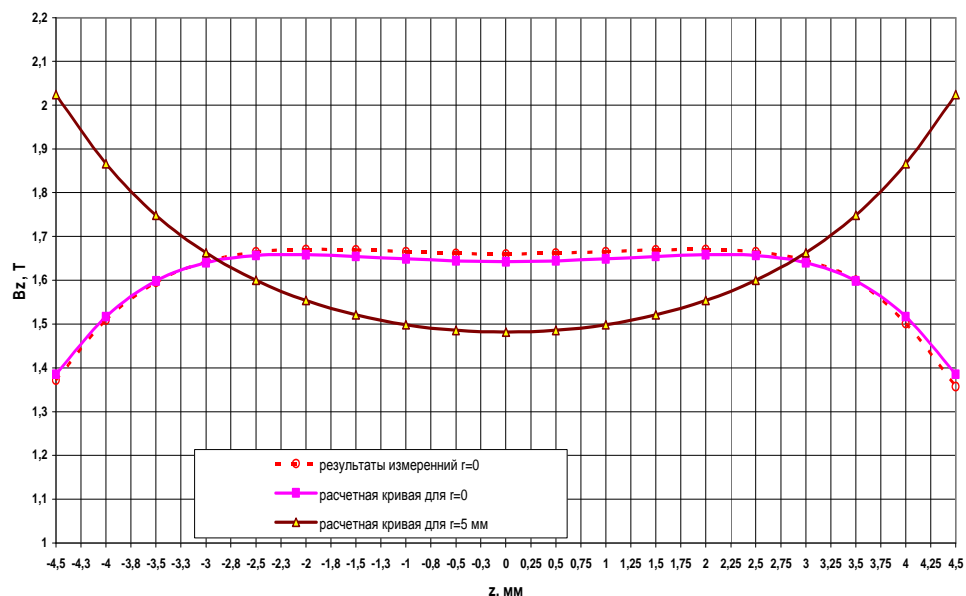


Рисунок 6

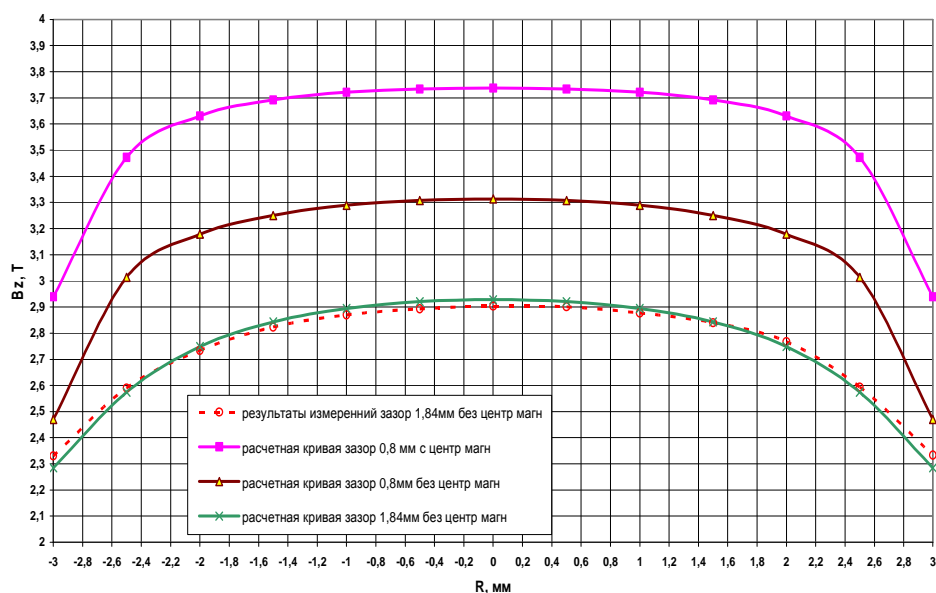


Рисунок 7

Здесь z – ось симметрии (ось вращения) магнитной системы. r – ось, перпендикулярная оси z . Начало координат ($z, r=0$) находится на оси вращения в центре рабочего зазора

На рис.7 приведены результаты расчетов и измерений магнитной индукции в центральной плоскости рабочего зазора магнитной системы №2.

Из-за сложности организации измерений в зазоре 0.8 мм, измерения проводились в зазоре 1.84 мм при разнесённых полюсных наконечниках. Совпадение расчетных и измеренных значений магнитной индукции позволяет предположить, что значения магнитной индукции в зазоре при рабочем положении полюсных наконечников так же соответствуют расчетным. Как видно из графиков на рис.7 использование комбинированной намагниченности магнитотвердых элементов магнитной системы позволяет увеличить амплитуду магнитной индукции в рабочем зазоре с 3.2 до 3.7 Тл, не увеличивая габаритов изделия.

В заключение можно сказать, что коллектив разработчиков выполнил поставленную перед нами задачу, используя современные материалы постоянных магнитов и подходы к проектированию подобных изделий.

Библиографический список

1. Сергеев К.Л. Малогабаритная система на постоянных магнитах с полем 1.1 Тл // ПТЭ №2 2009 г.
2. Рабинович Я.Д., Герберг А.Н. Машинное проектирование оптимальных магнитов из материала с постоянной намагниченностью. // Электромеханика, 1973, №10
3. Рабинович Я.Д., Герберг А.Н. Принцип взаимности и оптимальные конструкции постоянных магнитов. // Электромеханика 1980, №7
4. K. Halbach Accelerator // Conf., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26 (1979) 3882.
5. M.Kumada, M.Endo, M.Aoki, Y.Iwashita, E.I.Antokhin, G.Rakowsky, I.Bolshakova, R.Holyaka Model 4Tesla DiopleMagnet toward Final Focus Quadrupole // LC02, Feb.4-8, 2002, SLAC
6. Сергеев К.Л. Разработка магнитных систем электровакуумных приборов на основе постоянных магнитов из редкоземельных материалов. // дисс. на соиск. учен.ст. к.т.н./ Москва, 2010