

Экранирование рассеянных полей импульсных магнитов в каналах инжекции и вывода пучка протон-ионного ускорительного комплекса ИТЭФ

Н.Н. Алексеев, С.Л. Березницкий, Е.А. Сысоев

ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Введение

В ускорительном комплексе ИТЭФ применяются три типа С-образных импульсных поворотных магнитов, для которых требуется экранирование рассеянного поля. Поперечное сечение каждого из магнитов (рис.1) выбиралось, исходя из специфических требований его использования в ускорителе, а также ряда дополнительных условий: простоты и дешевизны конструкции, минимального количества типов, доступности материалов и др. Шихтованное ярмо магнитов собиралось из листовой электротехнической стали марки Э3407, Э3408 (ГОСТ 21427-83), толщиной 0,3–0,35 мм.

На рис. 2 показана кривая намагничивания, измеренная для магнита типа ПМ2, из которой видно, что насыщение достигается при величине индукции поля около 2 Тл. Проблема экранирования рассеянного поля магнитов состоит в том, чтобы при минимальной толщине стенки экрана (не более 2–3 мм), примыкающей к краю обмотки, получить ослабление рассеянного поля не менее чем в 50–100 раз.

Минимизация рассеянного поля

При разработке конструкции магнита исследовалось влияние на величину рассеянного поля габаритных размеров магнита и конструкции обмотки. Уменьшение отношения размера ярма к ширине магнитного зазора меньше единицы приводит к нарастающему увеличению рассеянного поля. На рис 3. показана характерная зависимость рассеянного поля в медианной плоскости магнита от размера ярма. Расчеты проводились для $\mu=1000$.

Влияние размеров обмотки на величину рассеянного поля показано на рис.4. Увеличение вертикального размера обмотки при сохранении высоты магнитного зазора приводит к монотонному изменению величины рассеянного поля за счет все большего «выпучивания» основного поля за пределы ярма магнита. Так как при достаточной ширине обмотки рассеянное поле направлено противоположно основному, выпучивание основного поля может приводить к изменению знака рассеянного поля на краю обмотки. В этом случае меняется конфигурация рассеянного поля с дипольной на квадрупольную.

Топография квадрупольного рассеянного поля показана на рис.5. Квадрупольное рассеянное поле может быть также получено при плоских полюсах магнита с уменьшением ширины обмотки. Квадрупольное поле более предпочтительно для экранирования, чем дипольное, так как позволяет обойтись меньшей толщиной экрана, в котором удастся минимизировать магнитный поток.

Конструкция магнитных экранов

Для экранирования от постоянных и медленно меняющихся магнитных полей используются ферромагнитные материалы, свойства которых выбираются в зависимости от величины поля и требований к качеству экранировки. В таблице дается классификация экранирующих свойств основных применяемых материалов. Низкоуглеродистая сталь является дешевым и технологичным материалом, хорошо обрабатывается, обладает высокими магнитными свойствами, высокой индукцией насыщения. Недостатком

кремнистой стали является твердость и хрупкость, а также пониженное по сравнению с низкоуглеродистой сталью значение индукции насыщения. Пермаллои обладают очень высоким значением магнитной проницаемости в слабых полях, их магнитные свойства очень чувствительны к механическим напряжениям. Высокие магнитные свойства пермалловых материалов получаются после их отжига в водороде или вакууме, поэтому они дорогостоящие.

Таблица. Свойства ферромагнитных материалов.

Индукция	Материал	$\mu_{нач}/10^3$	$\mu_{макс}/10^3$	$k_{экp}$	ρ , Ом м
> 1,5 Тл	Низкоуглеродистая сталь	0,25	3,5÷4,5	500	10^{-7}
>1,0 Тл	Электротехническая (кремнистая) сталь	0,2÷0,6	3÷8	10^3	$(3÷6) 10^{-7}$
<1,0 Тл	Пермаллой низконикелевый (40- 50% Ni)	2÷4	15÷60	10^4	$(5÷9) 10^{-7}$
<0,5 Тл	Пермаллой высоконикелевый (70-80%Ni)	15÷100	70÷300	10^5	$(2÷9) 10^{-7}$

В каналах транспортировки вводимого или выводимого пучков синхротрона поворотные магниты приходится размещать достаточно близко к равновесной орбите, область которой необходимо экранировать, поэтому экран неизбежно устанавливается в непосредственной близости от ярма магнита и замыкает на себя не только рассеянное поле, но и часть основного магнитного потока. Наиболее часто используется цилиндрическая конструкция экрана из ферромагнитного материала, охватывающая вакуумную камеру синхротрона. Такой экран достаточно эффективно работает и при отсутствии насыщения стенки, примыкающей к обмотке магнита, позволяет ослаблять рассеянное поле в сто и более раз.

В некоторых случаях применение цилиндрического экрана оказывается невозможным из-за конструктивных особенностей синхротрона или нецелесообразным по тем или иным причинам. В частности, при экранировании вакуумной камеры синхротрона, расположенной вблизи магнитного блока кольцевого магнита, цилиндрический экран может перехватывать достаточно большой магнитный поток рассеянного поля от этого блока, так как горизонтальная проекция такого экрана занимает значительную площадь. Следствием этого эффекта является уменьшение эффективной длины магнитного блока синхротрона и дополнительная нагрузка на ферромагнетик экрана, приводящая к его насыщению. Свободным от этого недостатка является плоский экран, устанавливаемый параллельно боковой плоскости магнита с небольшим воздушным зазором от ярма.

Экспериментальные результаты экранирования дипольного и квадрупольного рассеянного поля магнитов с помощью экранов из низкоуглеродистой стали показаны на рис. 6. Дипольное поле (от ПМ2) экранируется плоским экраном недостаточно эффективно: трехмиллиметровый экран ослабляет рассеянное поле не более чем в 5 раз, пятимиллиметровый – до 50 раз. Цилиндрический экран с толщиной стенки 3 мм ослабляет дипольное поле в 150 раз. Эффективность экранирования квадрупольного поля (от ПМ1) существенно выше: двухмиллиметровый экран позволил уменьшить рассеянное поле в 200 раз, трехмиллиметровый – в 400 раз.

Заключение

Эффективность экранирования рассеянного поля С-образного магнита существенно зависит не только от величины поля, но и от его конфигурации, определяемой конструкцией магнита. Показано, что конструкция обмотки магнита позволяет получить квадрупольную конфигурацию рассеянного поля, при которой решение проблема экранирования существенно упрощается.

Список литературы

1. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. В.Ш., М., 1976.

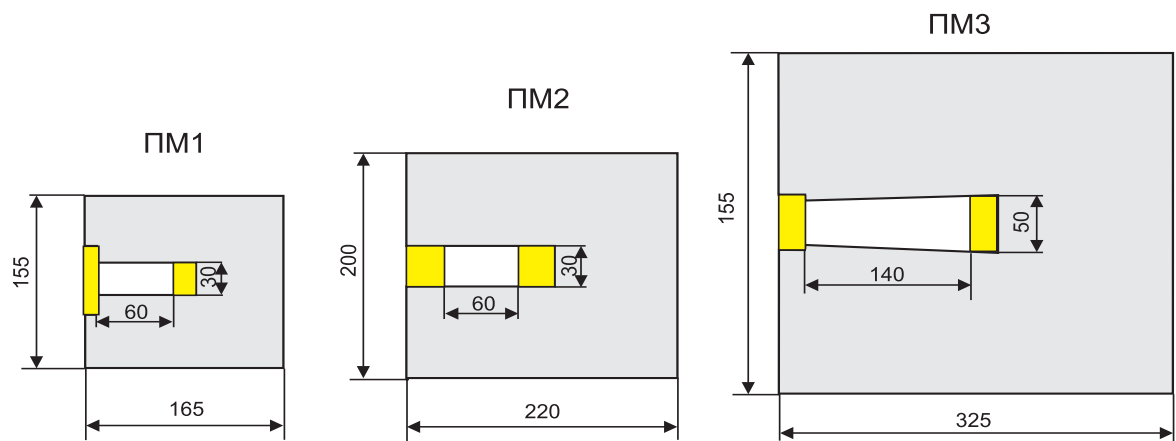


Рис.1. Поперечные сечения магнитов для каналов ввода/вывода пучка УК/У-10

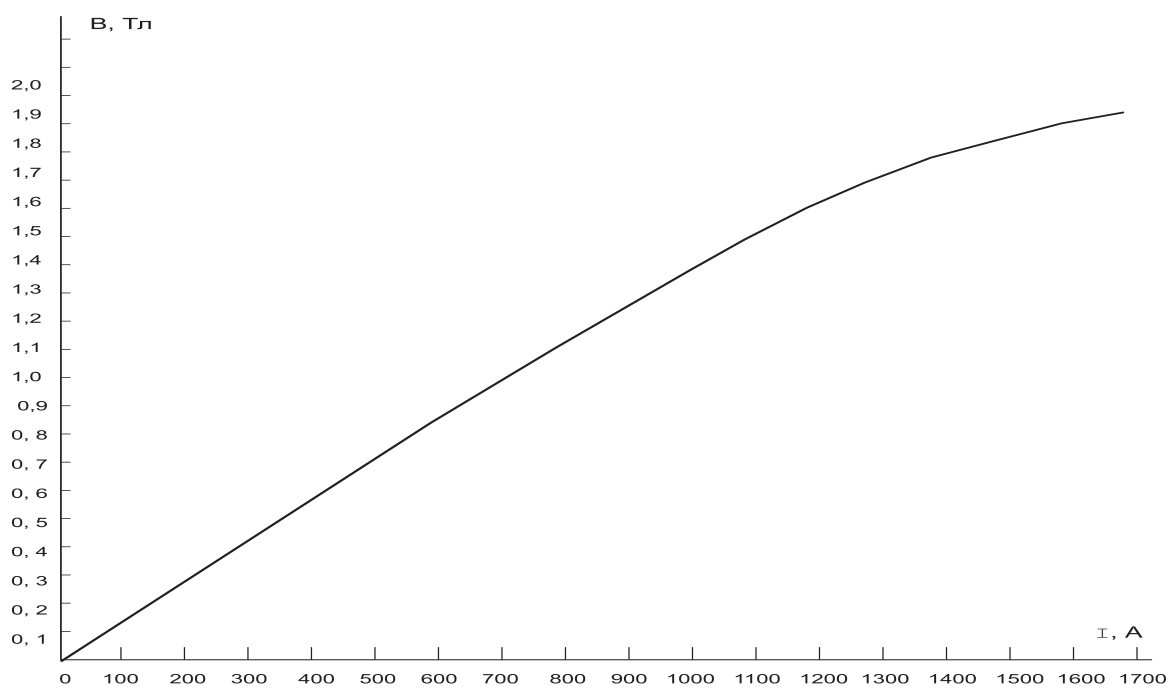


Рис.2. Кривая намагничивания магнита типа ПМ2.

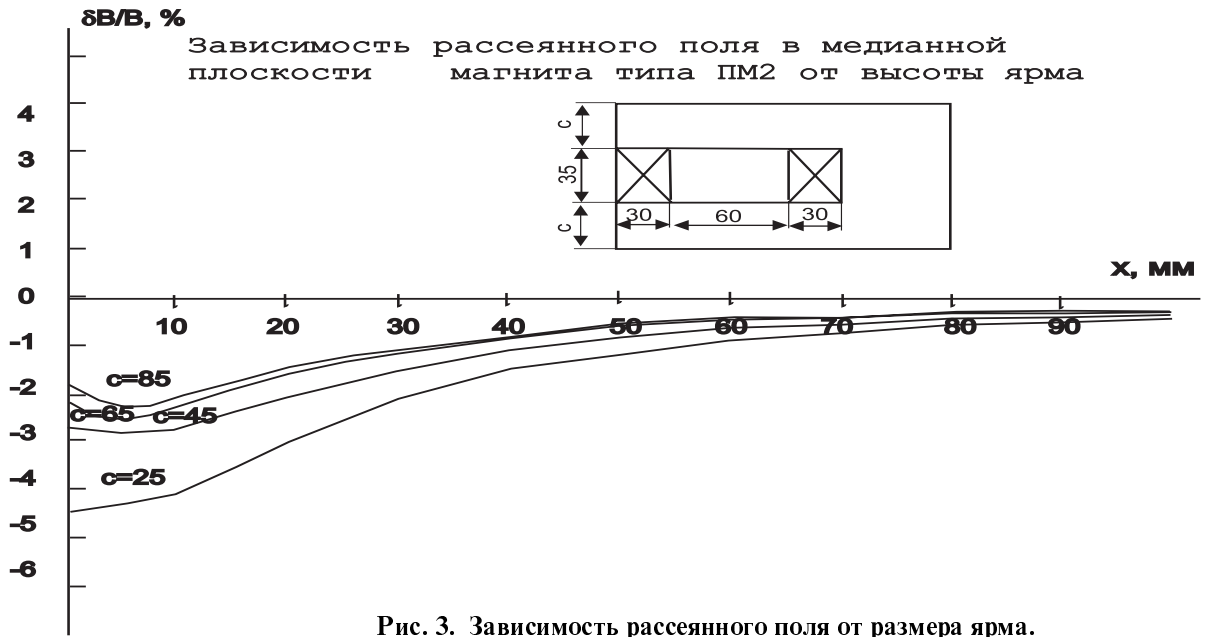


Рис. 3. Зависимость рассеянного поля от размера ярма.

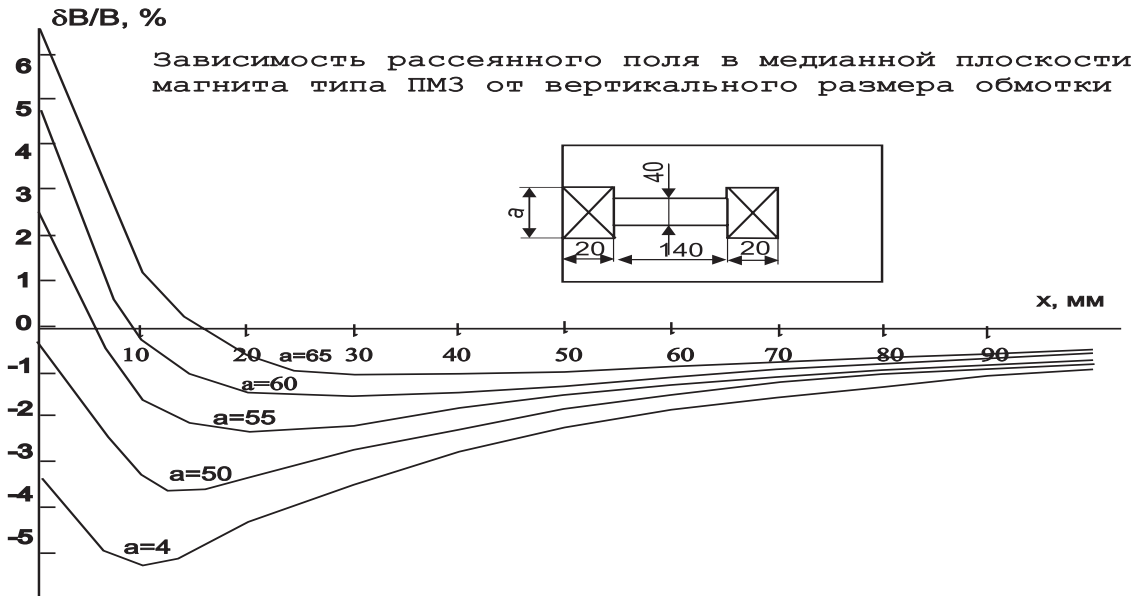


Рис.4. Зависимость рассеянного поля от вертикального размера обмотки.

Квадрупольное рассеянное поле

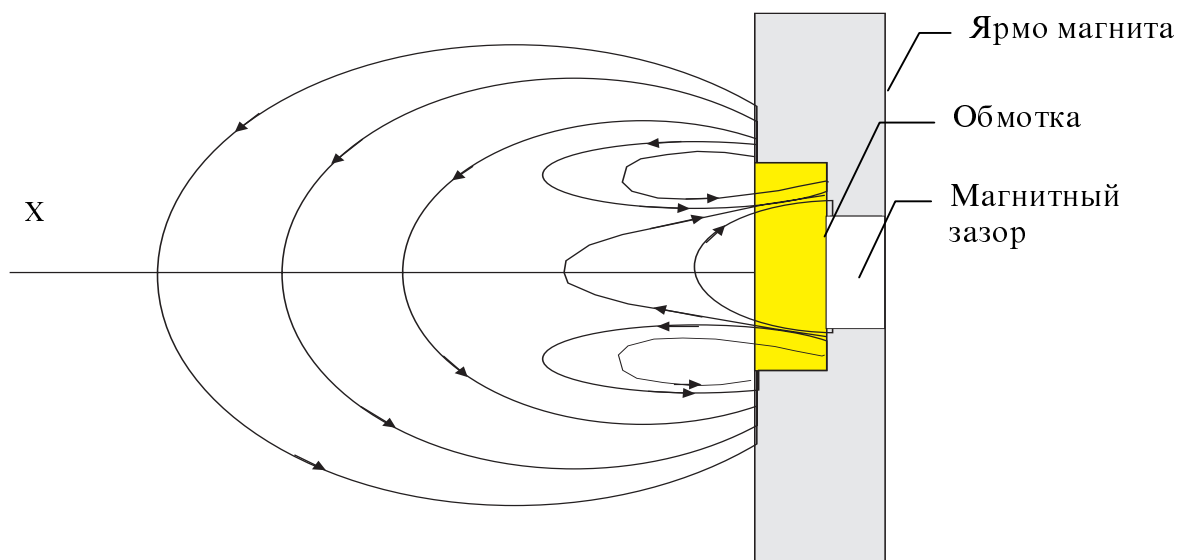


Рис. 5. Квадрупольная конфигурация рассеянного поля.

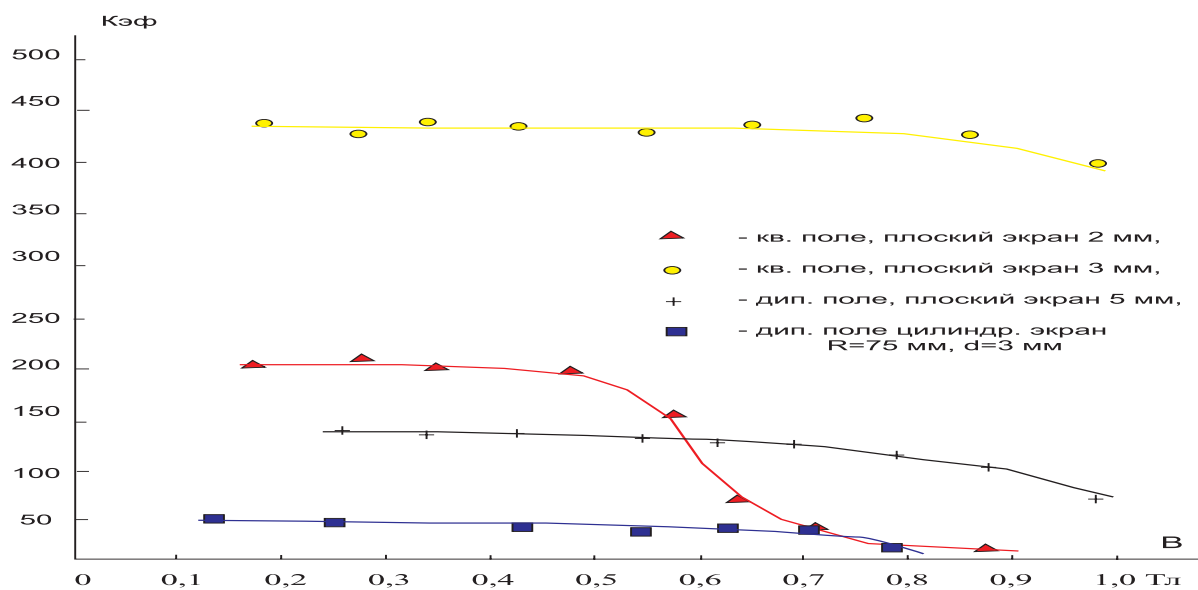


Рис.6. Коэффициенты ослабления рассеянного поля для разных конструкций магнита.