

Перспективы получения полей мегагауссного диапазона в двухмодульных квазибессиловых магнитных системах

О. С. Колтунов

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия

тел: (812) 555-42-86, эл. почта: tvn-spbspu@yandex.ru.ru

Неразрушаемые магниты сверхсильного поля являются важным инструментом, как для проведения разного рода теоретических исследований, так и для решения практических задач. Получение магнитных полей связано с электромагнитными силами и появлением механических напряжений в элементах магнитной системы. Поэтому главным ограничением при генерации предельных полей является, прежде всего, механическая прочность магнитной системы.

Прогресс в развитии современных неразрушаемых магнитов идет практически лишь за счет разработки и применения все более прочных материалов. Тем не менее, даже при использовании суперпрочных материалов, предел прочности σ_0 у которых более $2 \cdot 10^9$ Па, величина максимального генерируемого поля на сегодняшний день составляет около 80 Тл. Поле с индукцией порядка 100 Тл (1 Мегагаусс), по всей видимости, является максимальной величиной, которую можно получить в применяемых конструкциях. В качестве радикального средства снижения механических напряжений может быть предложена конструкция, в которой электромагнитные силы резко снижены за счет особого "бессилового" токораспределения, когда вектора тока и индукции близки к параллельным. Такое токораспределение достигается за счет протекания дополнительного полоидального тока в слоях системы и появления азимутального поля. Полоидальные токи требуют их замыкания в плоскости rz и появления в этой системе развитых торцов. При этом в системе можно выделить две области: уравновешенную (1) — приосевую зону, где поле приближенно к бессиловому и обмотка уравновешена полоидальным и азимутальным полями, и неуравновешенную (2) — внешнюю зону, где бессильное поле не может быть сформировано, но поле и, соответственно, усилия становятся более слабыми. В области (1) напряжения могут быть снижены до любой величины благодаря увеличению числа слоев обмотки, а в области (2) напряжения определяются неравновесным полем, которое тем меньше, чем больше внешний радиус области (1) и слабо зависят от числа слоев.

Как показали исследования, поиск согласованной равновесной геометрии системы является наиболее сложной задачей при создании таких магнитов. Выполненные расчеты по поиску возможных конфигураций показали, что предельные размеры области (1), ограничены, и отношение ее внешнего и внутреннего радиусов составляет $A=1.5-2$ раза. При этом, количество слоев системы слабо влияет на это соотношение, и в зоне (2) механические напряжения примерно ослабевают лишь в $A^2=4$ раза по отношению к магнитному давлению на оси магнита $B_0^2/(2\mu_0)$. Так в поле $B_0=100$ Тл магнитное давление составляет $4 \cdot 10^9$ Па, и ожидаемые механические напряжения

составляют 10^9 Па, что, очевидно, не позволяет применять в такой системы традиционные конструкционные материалы с $\sigma_0=400-600$ МПа.

Данное ограничение можно преодолеть в двухмодульной (многомодульной) системе где область (2) состоит из двух частей, которые находятся в еще более ослабленном неравновесном поле. Такая система состоит из двух коаксиальных модулей. Геометрия внутреннего модуля выбирается такой, чтобы он был либо полностью, либо частично уравновешен и упирался в бандаж, который расположен между первым и вторым модулем. Внешний модуль служит для формирования равновесной геометрии внутреннего модуля и также должен иметь равновесную геометрию. Он также упирается в бандаж и может быть частично или полностью уравновешен благодаря введению дополнительного внешнего цилиндрического экрана. Исследование всех возможных вариантов размеров модулей, расстояний между ними, размеров бандажей и расстояний до внешнего экрана позволило оценить уровень снижения механических напряжений и характерные размеры системы. Так для внутреннего модуля параметр A_1 близок к 2 и слабо зависит от нагружения бандажа между модулями. Оптимальное значение A_2 для второго модуля близко к 1.5. Такое значение параметров позволяет ожидать, что механические напряжения в неуравновешенных частях системы при генерации поля с индукцией 100 Тл составят всего около 500 МПа, что позволит использовать обычные материалы для получения рекордных полей в двухмодульных квазибессиловых системах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1101.2008.8.