

дикулярных направлениях, т. к. форма экрана мало влияет на эффективность М. э.).

Из ф-л (1) и (2) следует, что использование материалов с высокой магн. проницаемостью $\mu_{\text{экp}} \sim 10^3 - 10^4$ [таких, как пермаллой (36—85% Ni, остальное Fe и легирующие добавки) или мю-металл (72—76% Ni, 5% Cu, 2% Cr, 1% Mn, остальное Fe)] существенно улучшает качество экранов (у железа $\mu \approx 200$). Кажущийся очевидным способ улучшения экранирования за счёт утолщения стенки не оптимален. Эффективнее работают многослойные экраны с промежутками между слоями, для к-рых коэф. экранирования $K = V_{\text{внеш}}/V_{\text{внутр}}$ равен произведению коэф. для отд. слоев. Именно многослойные экраны (внеш. слой из магн. материалов, насыщающихся при высоких значениях B , внутренние — из пермаллоя или мю-металла) составляют основу конструкций магнитозащищенных комнат для биомагнитных, палеомагнитных и т. п. исследований. Следует отметить, что применение защитных материалов типа пермаллоя связано с рядом трудностей, в частности с тем, что их магн. свойства при деформациях и значит. нагревах ухудшаются, они практически не допускают сварки, значит. изгибов и др. механич. нагрузок. В совр. магн. экранах широко применяются ферромагн. *металлические стёкла* (метглассы), близкие по магн. свойствам к пермаллою, но не столь чувствительные к механич. воздействиям. Полотно, сотканное из полосок метгласса, допускает изготовление мягких магн. экранов произвольной формы, а многослойное экранирование этим материалом много проще и дешевле.

Экраны из материала с высокой электропроводностью (Cu, Al и др.) служат для защиты от переменных магн. полей. При изменении внеш. магн. поля в стенках экрана возникают индукц. токи, к-рые охватывают экранируемый объём. Магн. поле этих токов направлено противоположно внеш. возмущению и частично компенсирует его. Для частот выше 1 Гц коэф. экранировки K растёт пропорционально частоте:

$$K = \frac{\Delta B_{\text{внеш}}}{\Delta B_{\text{внутр}}} \sim \mu_0 \sigma L d f, \quad (3)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, σ — электропроводность материала стенки, L — размер экрана, d — толщина стенки, f — круговая частота.

Магн. экраны из Cu и Al менее эффективны, чем ферромагнитные, особенно в случае низкочастотного эл.-магн. поля, но простота изготовления и невысокая стоимость часто делают их более предпочтительными в применении.

Сверхпроводящие экраны. Действие экранов этого типа основано на *Мейснера эффекте* — полном вытеснении магн. поля из сверхпроводника. При всяком изменении внеш. магн. потока в сверхпроводниках возникают токи, к-рые в соответствии с *Ленца правилом* компенсируют эти изменения. В отличие от обычных проводников в сверхпроводниках индукц. токи не затухают и поэтому компенсируют изменение потока в течение всего времени существования внеш. поля. То обстоятельство, что сверхпроводящие экраны могут работать при очень низких температурах и полях, не превышающих критич. значения (см. *Критическое магнитное поле*), приводит к существенным трудностям при конструировании больших магнитозащищенных «теплых» объёмов. Однако открытие *окисных высокотемпературных сверхпроводников* (ОВС), сделанное И. Беднорцем и К. Мюллером (J. G. Bednorz, K. A. Müller, 1986), создаёт новые возможности в использовании сверхпроводящих магн. экранов. По-видимому, после преодоления технологич. трудностей в изготовлении ОВС, будут применяться сверхпроводящие экраны из материалов, становящихся сверхпроводниками при температурах кипения азота (а в перспективе, возможно, и при комнатных температурах).

Следует отметить, что внутри магнитозащищенного сверхпроводником объёма сохраняется остаточное по-

ле, существовавшее в нём в момент перехода материала экрана в сверхпроводящее состояние. Для уменьшения этого остаточного поля необходимо принять спец. меры. Напр., перевести экран в сверхпроводящее состояние при малом по сравнению с земным магн. поле в защищаемом объёме или использовать метод «раздвигания экранов», при к-ром обложка экрана в сложном поле переводится в сверхпроводящее состояние, а затем расправляется. Подобные меры позволяют пока в небольших объёмах, ограниченных сверхпроводящими экранами, свести остаточные поля до величины $\sim 10^{-12}$ Тл.

Активная защита от помех осуществляется при помощи компенсирующих катушек, создающих магн. поле, равное по величине и противоположное по направлению полю помехи. Алгебраически складываясь, эти поля компенсируют друг друга. Наиб. известны катушки Гельмгольца, представляющие собой две одинаковые соосные круговые катушки с током, раздвинутые на расстояние, равное радиусу катушек. Достаточно однородное магн. поле создаётся в центре между ними. Для компенсации по трём пространств. компонентам необходимы минимум три пары катушек. Существует много вариантов таких систем, и выбор их определяется конкретными требованиями.

Система активной защиты, как правило, используется для подавления НЧ-помех (в диапазоне частот 0—50 Гц). Одно из её назначений — компенсация пост. магн. поля Земли, для чего необходимы высокостабильные и мощные источники тока; второе — компенсация вариаций магн. поля, для к-рой могут использоваться более слабые источники тока, управляемые датчиками магн. поля, напр. *магнитометрами* высокой чувствительности — сквидами или *феррозондами*. В большой степени полнота компенсации определяется именно этими датчиками.

Существует важное отличие активной защиты от магн. экранов. Магн. экраны устраняют шуми во всём объёме, ограниченном экраном, в то время как активная защита устраняет помехи лишь в локальной области.

Все системы подавления магн. помех нуждаются в антивибрац. защите. Вибрация экранов и датчиков магн. поля сама может стать источником дополнит. помех.

Лит.: Роуз-Инс А., Родерик Е., Введение в физику сверхпроводимости, пер. с англ., М., 1972; Штамберггер Т. А., Устройства для создания слабых постоянных магнитных полей, Новосибир., 1972; Введенский В. Л., Ожогин В. И., Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм, М., 1986; Bednorz J. G., Müller K. A., Possible high Tc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system, «Z. Phys.», 1986, Bd 64, S. 189. С. П. Наурузов.

МАГНИТНО-ЖЕСТКИЕ МАТЕРИАЛЫ — то же, что *магнитно-твёрдые материалы*.

МАГНИТНО-МЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ — *магнитные материалы*, гл. обр. ферро- и ферримагнетики, обладающие малой *коэрцитивной силой* (условно $H_c \leq 800$ А/м) и рядом др. физ. свойств, определяющих широкое применение этих материалов в технике.

Наряду с коэрцитивной силой мерой магн. мягкости может служить также величина статич. *магнитной проницаемости* — начальной $\mu_0 \sim 10^2 - 10^5$ и максимальной $\mu_{\text{макс}} \sim 10^3 - 10^6$. В перем. полях, где б. ч. используются М.-м. м., важными характеристиками их являются: уд. магн. потери $P_{\text{вн}}/B$ — магн. индукция, Тл; f — частота, Гц) и динамич. проницаемость μ . С ростом B и f величина P возрастает, а μ снижается тем значительно, чем ниже уд. электросопротивление ρ М.-м. м. При частотах $f < 10^4 - 10^5$ Гц в качестве М.-м. м. применяются в основном металлич. сплавы, при более высоких частотах — тонкие *магнитные плёнки*, *магнитные диэлектрики* и *ферриты*.

Металлич. М.-м. м. подразделяются на 3 большие группы: I — железо различной степени чистоты и низкоуглеродистые стали; II — сплавы Fe — (0,05—5)% Si, или электротехнич. стали, и III — прецизионные М.-м. м.