

С.М. Аполлонский

---

# ЗАЩИТА ТЕХНОСФЕРЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ

В ТРЕХ ТОМАХ

Том 2  
Защитные материалы  
от физических полей и излучений

Монография

RU  
**sci**ence  
RU-SCIENCE.COM

Москва  
2021

УДК 504.75

ББК 20.1

А76

**Аполлонский С.М.**

**А76**

Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений. В 3 т. Т. 2. Защитные материалы от физических полей и излучений : монография / С.М. Аполлонский. — М. : РУСАЙНС, 2021. — 342 с.

**ISBN 978-5-4365-7589-6**

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами безопасности технических средств и человека при воздействии физических полей и излучений; для магистров, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области электромагнитной безопасности технических средств и биообъектов, а также для студентов технических учебных заведений, изучающих влияние на биосферу физических полей и излучений, включающих неионизирующие электромагнитные излучения, ионизирующие излучения и виброакустические воздействия. Рассмотренные вопросы могут оказаться полезными для медицинских работников, сталкивающихся с рассмотренными проблемами в практической деятельности.

*The book is intended for scientific and technical workers, dealing with the safety of technical facilities and on exposure to the physical fields and radiation; for graduate, post-graduate students and researchers specializing in the field of electromagnetic safety of technical devices and biological objects, as well as for students of technical schools, studying the impact on the biosphere of physical fields and radiation, including non-ionizing electromagnetic radiation, ionizing radiation, and vibro-acoustic effects. The above questions can be useful for health professionals faced with addressing the problem in practice.*

**УДК 504.75**

**ББК 20.1**

**ISBN 978-5-4365-7589-6**

© Аполлонский С.М., 2021

© ООО «РУСАЙНС», 2021

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Жизнедеятельность человека в окружающем его пространстве в значительной мере зависит от уровня суммарных физических полей и излучений, созданных как естественными условиями существования Вселенной и Земли, так и искусственными условиями, возникшими благодаря практической деятельности человечества. В ряде случаев суммарные воздействия физических полей и излучений на человека и разнообразные технические средства (ТС) могут превышать те предельно допустимые уровни, которые регламентированы нормативно-правовыми документами. Для снижения соответствующих воздействий до нормативного уровня приходится прибегать к созданию экранирующих устройств, использующих различные защитные материалы.

Во втором томе монографии рассмотрены современные материалы, которые используются при создании экранирующих устройств и систем, предназначенных для снижения уровня физических полей и излучений, воздействующих на человека и ТС.

В первом разделе (главы 1-5) рассмотрены материалы, которые используются для снижения уровня неионизирующих излучений. Среди основных требований, предъявляемых к ним можно назвать:

- Прочность, совместимость и электромагнитная стойкость экранирующих материалов: дефекты кристаллической решетки, жаропрочность и деформация металлов, совместимость защитных материалов, электромагнитная стойкость конструкционных материалов.

- Коррозия экранирующих материалов, используемых для защиты от всех видов излучений: классификация коррозионных процессов, двойной электрический слой, кинетика катодных процессов, кинетика анодных процессов, местная коррозия, влияние различных факторов на коррозию материалов, влияние облучения на коррозионные процессы.

- Стойкость защитных материалов от совместного действия как ионизирующих, так и неионизирующих излучений.

Во втором разделе (главы 6-9) рассмотрены материалы, рекомендуемые к использованию для снижения уровня ионизирующих излучений.

В третьем разделе (главы 10-11) рассмотрены материалы, используемые для снижения уровня виброакустических колебаний.

В главе 12 рассмотрены особенности защиты от сочетанного влияния физических полей и излучений.

# РАЗДЕЛ I. МАТЕРИАЛЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕИОНИЗИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЙ

## ВВЕДЕНИЕ

Современная жизнь ни в бытовой, ни в производственной сферах в настоящее время не мыслится и практически невозможна без использования электричества – этого самого гибкого и удобного источника энергии и средства обработки и передачи информации. Наши жилища и промышленные площади буквально напичканы всевозможным электрооборудованием, а стены, потолки и даже полы зданий нашпигованы устройствами для потребления, передачи и управления поступлением электроэнергии. Плотный контакт человека с действующими электротехническими устройствами начался уже более 100 лет тому назад и уже сравнительно давно человек осознал на собственной печальной практике, что к электричеству необходимо относиться в высшей степени осторожно. Правда, вначале человек понял опасность непосредственного контакта с электричеством. Здесь подразумевается искусственно созданное электричество, а не естественное в виде молний, опасность которой человек познал одновременно с познанием других грозных явлений природы. А вот опасность невидимого и неосязаемого косвенного воздействия электричества человечество почувствовало сравнительно недавно, хотя сам факт наличия электрических и магнитных полей (ЭП и МП), создаваемых действующими электрическими источниками известен давно, особенно специалистам в области электротехники.

В первую очередь, конечно, появились данные о нежелательном влиянии электромагнитных полей (ЭМП) на чувствительные к ним технические устройства и даже появилось особое направление радиотехники - «Электромагнитная совместимость» (ЭМС), которое занялось изучением возможности эксплуатации радиотехнических устройств в условиях их взаимного влияния, т. е. возможность сосуществования в системах «прибор-прибор».

Однако, постепенно, по мере накопления соответствующей информации, возникла проблема о возможности безопасного функционирования систем «прибор-человек», т. е. из сугубо технической области проблема ЭМС переместилась в области биофизики, радиобиологии, санитарии, гигиены и здравоохранения. И если сначала интерес представлял диапазон высоких и сверхвысоких частот (ВЧ и СВЧ), где эффект воздействия на человеческий организм при значительной интен-

сивности излучения проявлялся сравнительно быстро, то постепенно санитарно-гигиенические службы вынуждены были обратить внимание на особенности жизни и трудовой деятельности человека при длительном и практически непрерывном воздействии низких уровней ЭП и МП, создаваемых самым распространенными источниками (бытовым и офисным электрооборудованием), питаемыми от электросети промышленной частоты. Оказалось, что давно привычное и благоприятное нам соседство на деле таит в себе не менее опасные последствия, чем кратковременные воздействия ЭМП высоких частот и интенсивностей.

Отрицательное действие на биологические объекты, и в частности человека, низких уровней низкочастотных ЭМП, в том числе и промышленных, отмечено многими авторами фундаментальных научных исследований. В работах отмечалось, что большинство населения фактически живет в ЭМП сложной структуры (широкий частотный диапазон, конфигурация). По интенсивности ЭМП промышленных электроэнергетических объектов многократно превосходит интенсивность естественного ЭМП, а по своим характеристикам существенно от него отличается.

Электромагнитная среда обитания фактически может быть рассмотрена как источник помех в отношении жизнедеятельности человека и биоэкосистемы.

В этой связи возникают проблемы биоэлектромагнитной совместимости, как весьма сложная система взаимодействия живой природы и технических средств, источников ЭМП.

Значительное количество публикаций посвящено представлению результатов научных исследований в области воздействия на биологические организмы малоинтенсивных ЭП и МП низких частот и, в частности, источником которых являются электротехнические устройства, питаемые от сети промышленной частоты.

Справедливости ради следует отметить, что и средства массовой информации делают свой вклад в просвещение населения о существовании низкочастотных ЭМП в быту и на производстве и их возможном влиянии на здоровье, однако делают это в присущем современным СМИ сенсационном и резко устрашающем стиле. Конечно, такая трактовка положения с электромагнитным фоном – гипербола, но публицисты в чем-то и правы – современная электротехника не может предложить пользователю электроприборами ничего существенного для защиты от ЭП и МП низких частот, кроме давно известного экранирования. При этом хорошо известно, что экранироваться можно от ЭП, а от низкочастотного МП - практически невозможно. Но может быть путь

поиска средств или методов защиты не очень перспективен? Так, для примера, производители компьютерной техники, для которых проблема воздействия на пользователя широкого спектра ЭМП была проблемой сдерживающей развитие и распространение этой современной техники, пошли по другому пути – не предлагать пользователю защищаться, а разрабатывать и производить технику, не имеющую опасных уровней экологически и гигиенически вредных полей и излучений. И такой путь показал свою перспективность. Компьютерная техника последних десятилетий в основной своей номенклатуре соответствует санитарно-гигиеническим требованиям, т. е. в этом смысле она вполне безопасна, а пользователь не обременен необходимостью беспокоиться о защите. Это свидетельствует о том, что при желании, целеустремленности и правильно выбранном пути серьезная для компьютерной техники проблема может быть решена.

А вот более чем столетняя проблема ЭП, МП и ЭМП промышленных частот (50 Гц, 60 Гц, 400 Гц), хотя изучается фундаментально, но технически значимых или оригинальных решений не находит.

Конечно, сама мысль о том, чтобы создать, скажем, проводник, по которому течет переменный ток, имеющий высокий потенциал относительно земли и при этом не создающий вокруг себя МП и ЭП, кажется противоречащей основам электрофизики, а значит и неосуществимой. Однако, если иметь дело не с обособленными проводниками, а с их совокупностью, то дело может выглядеть иначе, о чем свидетельствует опыт разработчиков компьютерной техники.

Кроме того, опыт работы специалистов в области безопасности жизнедеятельности по аттестации и доработке рабочих мест показал, что в ряде случаев причиной наличия высоких уровней ЭП и МП промышленных частот являются устоявшиеся навыки и принципы монтажа электросетей и некоторых видов электрооборудования, которые не противоречат правилам «контактной» электробезопасности, но создают условия для появления «полевой» электроопасности.

В разделе рассмотрены материалы, с помощью которых можно существенно снизить интенсивности ЭП и МП, и даны практические рекомендации, выполнение которых позволяет простыми средствами улучшить электромагнитную обстановку в жилых и производственных помещениях и на рабочих местах; обеспечить защиту человека от воздействия экологически вредных низкочастотных полей, неизбежно проникающих во все сферы жизнедеятельности и быта при использовании сетевой электроэнергии. Этим автор стремится восполнить не-

достаток практических сведений по данному вопросу в существующих нормативных документах.

Экранирование остаётся одним из основных средств обеспечения ЭМС при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. В зависимости от конструкции и материала, из-которого выполнен экран, он по-разному ослабляет магнитную и электрическую составляющие по-мехонесущих ЭМП в заданном диапазоне частот.

При выборе материалов экрана следует исходить из учета ряда факторов. Должны быть приняты во внимание вопросы экономики, технологии обработки, требования по стабильности и факторы, относящиеся к особенностям функциональных материалов. Многие из этих факторов являются универсальными и относятся ко всем рассматриваемым материалам. Так, например, всегда желательно, чтобы стоимость была как можно ниже, а свойства материалов оставались, после обработки и в процессе эксплуатации, стабильными и не возникало физических и химических изменений.

Противоречивость требований к материалам компонентов экрана приводит к тому, что приходится идти на компромисс, чтобы обеспечить согласование состава и технологии изготовления. Так, например, стремление достигнуть максимального повышения электропроводимости путем внесения, по возможности, минимальных изменений в состав композиции экрана может привести к ухудшению физических параметров, к повышению стоимости, что значительно усложняет процесс изготовления. Разработчик экранов из полимерных материалов должен быть готов к тому, что всегда может возникнуть необходимость компромиссных решений для конкретного случая их применения.

Для материалов, используемых в качестве подложек, наибольший интерес представляют следующие свойства: удельное сопротивление, диэлектрическая постоянная, термостойкость, прочность, характеристики поверхности, химическая активность, теплопроводность.

В ряде случаев, важным фактором является устойчивость материала экрана против воздействия припоя. Ряд трудностей вызывает растворимость металлов в жидком припое.

Образование поверхностных загрязнений частиц также сказывается на адгезионных свойствах композиции. Сам механизм адгезии исследован недостаточно. В большинстве случаев о влиянии многих материалов и технологических процессов на адгезию можно только догадываться.

Закон распределения размеров и форма частиц оказывают сильное влияние на многие физические и электрические свойства. Многие металлы или сплавы не могут применяться только из-за того, что изготовление из них порошков обходится очень дорого.

Из рассмотрения химических взаимодействий, которые могут иметь место при изготовлении экранов, становятся понятными требования совместимости функциональных материалов с технологическими процессами.

Важной характеристикой любых экранирующих материалов является стабильность их параметров при хранении и эксплуатации.

Разработано много различных методов испытания параметров материалов и среди них испытания под воздействием повышенных температур в различных климатических условиях, включая высокую влажность. Все эти явления обусловлены теми же физико-химическими реакциями, которые имеют место в технологическом процессе.

При измерении эффективности экранирующих материалов основные трудности возникают при отделении действительных свойств материалов от влияния внешних второстепенных факторов измерений таких, как тип измерительных антенн, ориентация внешних ЭМП помех, распределение полей в измерителях, резонансные эффекты и другие явления, которые не всегда поддаются расчету и учёту при измерениях. Для конкретного экранирующего материала незначительные изменения этих факторов приводит к большому разбросу измеренных значений.

Основной задачей монографии является ознакомление читателей с различными видами материалов, которые рекомендуются к использованию для снижения уровней неионизирующих полей и излучений во всём диапазоне частот их существования.

# ГЛАВА 1. ЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ ТРЕБОВАНИЯ

## 1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЗАЩИТНОЙ СРЕДЫ

### 1.1.1. МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СРЕДЫ

ЭМП можно рассматривать как особое свойство материи. Оно характеризуется четырьмя векторными величинами:  $\vec{E}$  - напряженностью ЭП;  $\vec{D}$  - электрической индукцией;  $\vec{H}$  - напряженностью МП;  $\vec{B}$  - магнитной индукцией. Определить ЭМП в некоторой области пространства – значит указать эти векторы в любой ее точке. Таким образом, ЭМП предстает как совокупность ЭП ( $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ) и МП ( $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$ ), находящихся во взаимной зависимости. Деление ЭМП на эти две составляющие относительно, оно зависит от условий наблюдения и возможно только при макроскопическом рассмотрении явлений.

Связь векторов ЭМП в некоторой материальной среде характеризуется уравнениями

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad \vec{\delta} = \gamma \vec{E}, \quad (1.1)$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $\gamma$  - удельная проводимость.

Параметры  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  (материальные параметры) среды, выражающие макроскопические электромагнитные свойства среды, устанавливаются экспериментально.

Свойства вакуума характеризуются постоянными  $\varepsilon_0 \cdot \mu_0$   
( $\varepsilon_0 = (1 / 4\pi) \cdot 10^{-9}$  Ф/м,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м). Часто, для удобства характеризовать среды по сравнению с вакуумом, вводят относительные проницаемости

$$\mu_r = \mu / \mu_0, \quad \varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0. \quad (1.2)$$

Макроскопические параметры  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  в большинстве случаев можно считать независимыми от векторов ЭМП. Соответственно этому

употребляется выражение «линейные среды». Однако существуют и часто имеют важное техническое значение среды, отличающиеся заметной зависимостью макроскопических параметров от векторов поля. Такие среды называют «нелинейными». Различают диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики – вещества, магнитная проницаемость которых отличается от магнитной проницаемости вакуума. Кроме того, у ферромагнетиков магнитная проницаемость сильно зависит от МП. Им аналогичны сегнетоэлектрики, обладающие сходной зависимостью диэлектрической проницаемости от ЭП. Нелинейность ряда сред проявляется в сильных полях [1.1, 1.2].

**Диамагнетики.** К диамагнетикам относятся вещества, у которых магнитный момент атома  $\vec{p}_{mA}$  или молекулы в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю.

$$\vec{p}_{mA} = 0 \quad (1.3)$$

Магнитные моменты электронов в таких атомах в отсутствие внешнего магнитного поля взаимно скомпенсированы. Это характерно для атомов и молекул с полностью заполненными электронными оболочками, например для атомов инертных газов, молекул водорода, азота. При внесении такого вещества в магнитное поле его атомы и молекулы, согласно теореме Лармора, приобретают наведенные магнитные моменты, направленные для всех атомов и молекул одинаково против поля. Таким образом, вещество приобретает незначительную намагниченность, направленную против поля, вследствие чего диамагнетик выталкивается из неоднородного магнитного поля в направлении уменьшения напряженности поля. Для диамагнетиков  $\chi$  отрицательна и очень мала, порядка  $\sim 10^{-6}$ . Магнитная восприимчивость  $\mu_r = (1 + \chi)$  соответственно больше нуля и меньше единицы.

Для диамагнитных веществ существует линейная зависимость намагниченности от величины напряженности внешнего поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (2.5)$$

Таким образом, диамагнитные вещества намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном направлению вектора магнитной индукции. Это свойство называется диамагнетизмом (диамагнитным эффектом). Характерно то, что диамагнетизм не зависит от температуры. Данное свойство присуще не только диамагнетикам, но и всем без исключения веществам, однако у пара- и

ферромагнетиков диамагнетизм незаметен из-за наличия у них более сильных эффектов.

**Парамагнетики.** К парамагнетикам относятся вещества, у которых магнитный момент атомов  $\vec{p}_{mA}$  или молекул отличен от нуля в отсутствие внешнего магнитного поля:

$$\vec{p}_{mA} \neq 0$$

Поэтому парамагнетики при внесении их во внешнее МП намагничиваются в направлении поля. В отсутствие внешнего МП парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения все магнитные моменты атомов ориентированы беспорядочно, и поэтому намагниченность равна нулю. При внесении парамагнетика во внешнее МП устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по полю. Полной ориентации препятствует тепловое движение атомов, которое стремится разбросать моменты. В результате такой преимущественной ориентации парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, которое, накладываясь на внешнее поле, усиливает его. Этот эффект называется парамагнитным эффектом или парамагнетизмом.

У парамагнетиков также наблюдаются Ларморова прецессия и диамагнитный эффект, как и во всех веществах. Но диамагнитный эффект слабее парамагнитного и подавляется им, оставаясь незаметным. Для парамагнетиков  $\chi$  тоже невелика, но положительна, порядка  $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$ , а значит,  $\mu_r$  немногим больше единицы.

Так же, как и для диамагнетиков, зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков от внешнего поля линейная. Преимущественная ориентация магнитных моментов по полю зависит от температуры. С ростом температуры усиливается тепловое движение атомов, следовательно, ориентация в одном направлении становится затрудненной и намагниченность уменьшается.

**Ферромагнетики.** Вещества, образующие третью группу и называемые ферромагнетиками, представляют наибольший интерес для науки и техники. Явление ферромагнетизма известно человечеству уже более трех тысячелетий, а первые упоминания о ферромагнитных материалах встречаются в древних китайских рукописях, относящихся к 1110 г. до нашей эры. Ферромагнетики – твердые кристаллические ве-

щества, обладающие самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью в отсутствие внешнего МП. Атомы (молекулы) таких веществ обладают отличным от нуля магнитным моментом. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты в пределах больших областей ориентированы одинаково (подробнее об этом будет сказано далее). В отличие от слабомагнитных диа- и парамагнетиков ферромагнетики - это сильномагнитные вещества. Их внутреннее магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить внешнее. Для ферромагнетиков  $\chi$  и  $\mu_r$  положительны и могут достигать очень больших значений, порядка  $\sim 10^3 \div 10^5$ . Только ферромагнетики могут быть постоянными магнитами.

Для ферромагнетиков  $\vec{J}$  зависит от  $\vec{H}$  нелинейно ( $\vec{J} = F(\vec{H})$ ). Предположим, что при  $\vec{H} = 0$  начальный магнитный момент ферромагнетика также был равен нулю. Вместе с ростом напряженности поля начинается резкое нелинейное нарастание намагниченности  $\vec{J}$ , при напряженностях порядка нескольких сотен А/м  $\vec{J}$  достигает насыщения и не изменяется с дальнейшим увеличением  $\vec{H}$  рис. 1.1.

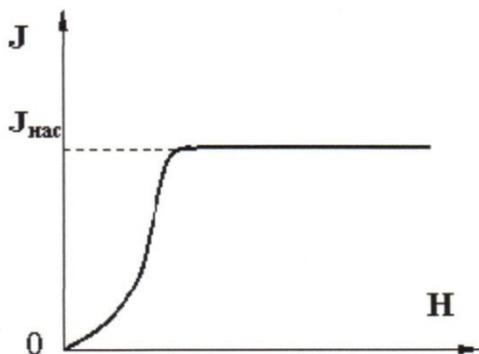


Рис. 1.1. Основная кривая намагничивания

Функция  $\vec{J} = F(\vec{H})$  называется основной или нулевой кривой намагничивания, так как первоначально намагниченность была нуле-

вой. Такая зависимость впервые была получена и исследована русским ученым А. Г. Столетовым (1872 г.) в его докторской диссертации [1.3].

Если мы изобразим основную кривую намагничивания в координатах  $(\vec{B}, \vec{H})$  (рис. 2.2, кривая 0-1), то получим несколько другую картину: так как  $\vec{B} = (\vec{H} + \vec{J})\mu_0$ , то при достижении значения  $\vec{J}_{нас}$  магнитная индукция  $\vec{B}$  продолжает расти вместе с ростом  $\vec{H}$  линейно:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + const, \quad const = \mu_0 \vec{J}_{нас}, \quad (1.6)$$

Для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса (от греч. hysteresis – отставание, запаздывание).

Доведем намагниченность тела до насыщения, повышая напряженность внешнего поля (рис. 1.2, точка 1), а затем будем уменьшать

$\vec{H}$ . При этом зависимость  $\vec{B}(\vec{H})$  следует не первоначальной кривой 0-1, а новой кривой 1-2. При уменьшении напряженности до нуля намагниченность вещества и магнитная индукция исчезнут. При

$\vec{H} = 0$  магнитная индукция имеет ненулевое значение  $\vec{B}_{ост}$ , которое называется остаточной индукцией. Намагниченность  $\vec{J}_{ост}$ , соответствующая

$\vec{B}_{ост}$ , называется остаточной намагниченностью, а ферро-

магнетик приобретает свойства постоянного магнита.  $\vec{B}_{ост}$  и  $\vec{J}_{ост}$

обращаются в нуль лишь под действием поля, противоположного по

направлению первоначальному. Значение напряженности поля  $\vec{H}_c$ ,

при котором остаточные намагниченность и индукция обращаются в нуль, называется коэрцитивной силой (от лат. coercitio - удержание).

Продолжая действовать на ферромагнетик переменным магнитным полем, получим кривую 1-2-3-4-1, называемую петлей гистерезиса. В

данном случае реакция тела ( $\vec{B}$  или  $\vec{J}$ ) как бы отстает от вызывающих ее причин ( $\vec{H}$ ).

Существование остаточной намагниченности делает возможным изготовление постоянных магнитов, потому что ферромагнетики с

$\vec{B}_{ост} \neq 0$  обладают постоянным магнитным моментом и создают в окружающем их пространстве постоянное магнитное поле. Такой магнит тем лучше сохраняет свои свойства, чем больше коэрцитивная сила материала, из которого он изготовлен. Магнитные материалы принято делить по величине  $\vec{H}_c$  на магнитно-мягкие (т. е. с малой  $\vec{H}_c$  порядка  $10^{-2}$  А/м и соответственно с узкой петлей гистерезиса) и магнитно-жесткие ( $\vec{H}_c \sim 10^5$  А/м и широкая петля гистерезиса). Магнитно-мягкие материалы используются при экранировании ЭМП, при изготовлении трансформаторов, сердечники которых постоянно перемагничиваются переменным током. Если сердечник трансформатора будет обладать большим гистерезисом, он будет нагреваться при перемагничивании, на что будет напрасно расходоваться энергия. Поэтому для трансформаторов требуются по возможности безгистерезисные материалы. К ферромагнетикам с узкой петлей гистерезиса относятся сплавы железа с никелем или железа с никелем и молибденом (пермаллой и супермаллой).

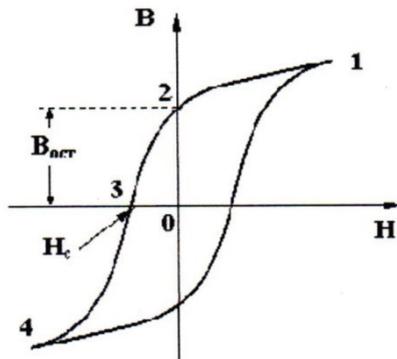


Рис. 1.2. Петля гистерезиса ферромагнетика

Магнитно-жесткие материалы (к ним относятся углеродистые, вольфрамовые, хромовые и алюминиево-никелевые стали) служат для изготовления постоянных магнитов. Остаточная постоянная намагниченность будет существовать бесконечно долго, если не подвергать ферромагнетик действию сильных магнитных полей, высоких температур и деформации. Вся информация, записанная на магнитных лентах –

от музыкальных до видеопрограмм, – сохраняется благодаря этому физическому явлению.

Существенной особенностью ферромагнетиков являются огромные величины магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости. Например, для железа  $\mu_{r\max} \approx 5000$ , для пермаллоя – 100000, для супермаллоя – 900000 [1.4]. Для ферромагнетиков величины магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости являются функциями напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  (рис. 1.3). С ростом напряженности поля значение  $\mu_r$  сначала быстро возрастает до  $\mu_{r\max}$ , а затем уменьшается, приближаясь к значению  $\mu_r = 1$  в очень сильных полях. Поэтому, хотя формула  $\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$  остается справедливой и для ферромагнитных веществ, линейная зависимость между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  нарушается.

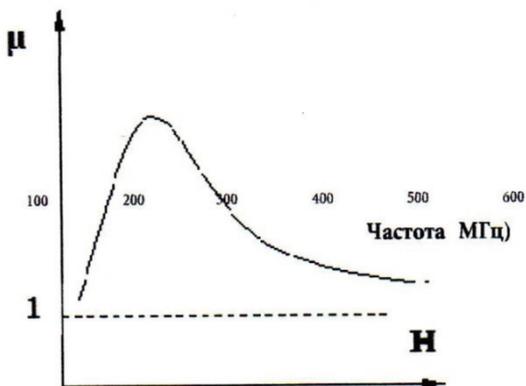


Рис. 1.3. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля

В середине XIX в. было открыто два магнитомеханических эффекта, свойственных ферромагнетикам. Первый из них – это магнитострикция – изменение формы и размеров тела при его намагничивании. Магнитострикция была обнаружена Джоулем в 1842 г. [1.5]. Явление магнитострикции используется в такой специфической области техники, как подводная сигнализация и определение глубин морей при конструкции приборов, называемых эхолотами.

Второй магнитомеханический эффект – это эффект Виллари – изменение и даже исчезновение остаточной намагниченности тела при его сотрясении или деформации (открыт Э.Виллари в 1865 г.). Именно из-за этого постоянные магниты следует предохранять от ударов.

Аналогично деформации на ферромагнетики действует нагревание. С повышением температуры остаточная намагниченность начинает уменьшаться, вначале слабо, а затем, при достижении некоторой достаточно высокой температуры, характерной для каждого ферромагнетика, происходит резкий спад намагниченности до нуля. Тело при этом становится парамагнетиком. Температура, при которой происходит такое изменение свойств, называется точкой Кюри, в честь открывшего ее П. Кюри. Для железа точка Кюри равняется 770 °С, для кобальта – 1130 °С, для никеля – 358 °С, для гадолиния – 16 °С. Этот переход не сопровождается выделением или поглощением тепла и является фазовым переходом II рода. Все эти явления находят свое объяснение при рассмотрении структуры ферромагнетиков.

**Сегнетоэлектрики.** Сегнетоэлектрики - это диэлектрики, обладающие в определенном интервале температур спонтанной (самопроизвольной) поляризованностью, т. е. поляризованностью в отсутствие внешнего электрического поля. К сегнетоэлектрикам относятся, например, детально изученные И. В. Курчатовым (1903-1960) и П. П. Кобеко (1897-1954) сегнетова соль  $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$  (от нее и получили свое название сегнетоэлектрики) и титанат бария  $BaTiO_3$  [11.6].

При отсутствии внешнего электрического поля сегнетоэлектрик представляет собой как бы мозаику из доменов - областей с различными направлениями поляризованности. Это схематически показано на

примере титаната бария (рис. 1.3), где стрелки и знаки  $(\cdot)$ ,  $\oplus$  указывают направление вектора  $\vec{P}$ . Так как в смежных доменах эти направления различны, то в целом дипольный момент диэлектрика равен нулю. При внесении сегнетоэлектрика во внешнее поле происходит переориентация дипольных моментов доменов по полю, а возникшее при этом суммарное электрическое поле доменов будет поддерживать их некоторую ориентацию и после прекращения действия внешнего поля. Поэтому сегнетоэлектрики имеют аномально большие значения ди-

электрической проницаемости (для сегнетовой соли, например,  $\varepsilon_{r\max} = 10^4$ ).

Сегнетоэлектрические свойства сильно зависят от температуры. Для каждого сегнетоэлектрика имеется определенная температура (точка Кюри), выше которой его необычные свойства исчезают и он становится обычным диэлектриком. Как правило, сегнетоэлектрики имеют только одну точку Кюри; исключения составляют лишь сегнетова соль (-18 и +24°C) и изоморфные с нею соединения. В сегнетоэлектриках вблизи точки Кюри наблюдается также резкое возрастание теплоемкости вещества. Превращение сегнетоэлектриков в обычный диэлектрик, происходящее в точке Кюри, сопровождается фазовым переходом II рода.

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r$  (а следовательно, и диэлектрическая восприимчивость среды  $\chi^e$ ) сегнетоэлектриков зависит от напряженности  $\vec{E}$  поля в веществе, а для других диэлектриков эти величины являются характеристиками вещества.

Для сегнетоэлектриков формула  $\vec{P} = \chi^e \varepsilon_0 \vec{E}$  не соблюдается; для них связь между векторами поляризованности ( $\vec{P}$ ) и напряженности ( $\vec{E}$ ) нелинейная и зависит от значений  $\vec{E}$  в предшествующие моменты времени. В сегнетоэлектриках наблюдается явление диэлектрического гистерезиса («запаздывания»). Как видно из рис. 1.4, с увеличением напряженности  $\vec{E}$  внешнего электрического поля поляризованность  $\vec{P}$  растет, достигая насыщения (кривая 1). Уменьшение  $\vec{P}$  с уменьшением  $\vec{E}$  происходит по кривой 2, и при  $\vec{E} = 0$  сегнетоэлектрик сохраняет остаточную поляризованность  $\vec{P}_0$ , т. е. сегнетоэлектрик остается поляризованным в отсутствие внешнего электрического поля. Чтобы уничтожить остаточную поляризованность, надо приложить электрическое поле обратного направления ( $-\vec{E}_c$ ). Величина  $\vec{E}_c$  называется коэрцитивной силой (от лат. coercitio - удерживание). Если

далее  $\vec{E}$  изменять, то  $\vec{P}$  изменяется по кривой 3 петли гистерезиса [1.7].

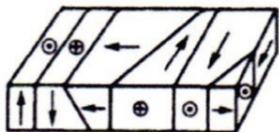


Рис. 1

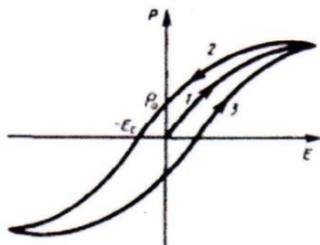


Рис. 2

Рис. 1.4. Кривая гистерезиса сегнетоэлектриков  $P = F(E)$

Интенсивному изучению сегнетоэлектриков послужило открытие академиком Б. М. Вулом (1903-1985) аномальных диэлектрических свойств титаната бария. Титанат бария из-за его химической устойчивости и высокой механической прочности, а также из-за сохранения сегнетоэлектрических свойств в широком температурном интервале нашел большое научно-техническое применение (например, в качестве генератора и приемника ультразвуковых волн). В настоящее время известно более сотни сегнетоэлектриков, не считая их твердых растворов. Сегнетоэлектрики широко применяются также в качестве защит-

ных материалов, обладающих большими значениями  $\epsilon_r$  [1.8].

За исключением специальных случаев, относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ , где  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость воздуха, большинства употребительных материалов больше единицы (см. табл. 1.1).

Относительная магнитная проницаемость чаще всего незначительно отличается от единицы. Вещество называется парамагнетиком, если  $\mu_r > 1$ , и диамагнетиком в случае  $\mu_r < 1$ . У ферромагнетиков магнитная проницаемость  $\mu_r \gg 1$  (см. табл. 1.2).

Таблица 1.1

Относительная диэлектрическая проницаемость ряда  
защитных материалов,  $\epsilon_r$

Воздух $0^\circ \text{C}$	1,0006
Вода дистиллированная	81,1
Спирт этиловый	25,8
Кварц плавленый	3,8
Стекло	3 – 10
Титанит бария ( $\text{BaTiO}_3$ )	$\approx 10^4$
Стеатит	6,25
Слюда	5 – 6
Парафин	2,2
Тефлон	2,1

В зависимости от величины электропроводности вещества делят на проводники и диэлектрики (изоляторы). Промежуточную область составляют полупроводники.

Во многих задачах теории ЭМП реальный проводник или диэлектрик с успехом заменяют идеализированным. При этом используются понятия идеального проводника ( $\gamma \rightarrow \infty$ ) и идеального диэлектрика ( $\gamma \rightarrow 0$ ).

В задачах теории поля, как правило, имеют дело с так называемыми изотропными средами, материальные свойства которых одинаковы для полей любых направлений. Согласно уравнениям (2.1), векторы  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ ,  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ , а также  $\vec{\delta}$  и  $\vec{E}$  в этих средах параллельны. Заменяв одно из соотношений, например, для магнитной индукции в системе координат  $x, y, z$  тремя скалярными

$$B_x = \mu H_x, \quad B_y = \mu H_y, \quad B_z = \mu H_z, \quad (1.7)$$

видим, что функционально связаны только одноименные проекции участвующих векторов ( $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ ).

Таблица 1.2

Относительная магнитная проницаемость ряда  
защитных материалов,  $\mu_r$

Материал	Начальная $\mu_r$	Максимальная $\mu_r$	Индукция $B$ (у колена кривой намагничивания)
Чугун	-	600	
Мягкая магнитная сталь	200	5500	2,15
Электротехническая сталь	400	7500	2,15
65% пермаллой	1500	400000	1,35
Суперпермаллой	100000	800000	0,75
Пермендюр	1100	4000	2,45
Перминвар	850	4000	1,25
Феррит	2500	8000	0,24
Оксифер-200	200	350	0,33

Однако существуют среды, проявляющие разные свойства в зависимости от направления поля. Они называются анизотропными. В случае общей анизотропии в МП (анизотропный ферромагнетик) вместо (1.7) будем иметь [1.2]

$$\begin{aligned}
 B_x &= \mu_{xx}H_x + \mu_{xy}H_y + \mu_{xz}H_z, \\
 B_y &= \mu_{yx}H_x + \mu_{yy}H_y + \mu_{yz}H_z, \\
 B_z &= \mu_{zx}H_x + \mu_{zy}H_y + \mu_{zz}H_z.
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

Каждая проекция вектора  $\vec{B}$  здесь зависит от трех проекций  $\vec{H}$ , а векторы  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  уже не параллельны.

Всю совокупность действий, производимых над проекциями вектора  $\vec{H}$  для получения вектора  $\vec{B}$ , условно обозначают оператором [1.9]