

1. Основные характеристики электромагнитного поля и среды.

Электромагнитная волна — это колебательный процесс, связанный с изменяющимися в пространстве и во времени взаимосвязанными электрическими и магнитными полями. Область распространения электромагнитных волн называется электромагнитным полем (ЭМП). Электромагнитное поле характеризуется векторами электрической напряженности E и индукции D , магнитной напряженности H и индукции B .

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(x_i, t), \quad \mathbf{D} = \mathbf{D}(x_i, t), \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}(x_i, t), \quad \mathbf{B} = \mathbf{B}(x_i, t).$$

Единица измерения напряженности электрического поля, согласно международной системе — вольт на метр (В/м), электрической индукции — кулон на квадратный метр (Кл/м²), напряженности магнитного поля — ампер на метр (А/м), магнитной индукции — тесла (Тл). Векторы E и B однозначно определяются силовым воздействием поля на пробный заряд $q_{\text{п}}$ (точечный малый заряд, не изменяющий исследуемое поле). На пробный заряд $q_{\text{п}}$, помещенный в какой-либо точке пространства и движущийся со скоростью v , действует сила Лоренца (H), равная

$$\mathbf{F} = q_{\text{п}} \mathbf{E} + q_{\text{п}} [\mathbf{v} \mathbf{B}].$$

Отсюда вектор напряженности электрического поля E определяется как сила, действующая на неподвижный ($v = 0$) единичный заряд

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_{\text{п}}}.$$

Вектор индукции B определяется добавочной силой

$$\mathbf{F}_{\text{д}} = q_{\text{п}} [\mathbf{v} \mathbf{B}].$$

Электромагнитное поле можно характеризовать так называемыми электромагнитными потенциалами — векторным потенциалом A и скалярным φ . Эти величины связаны с векторами E и B следующим образом:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t},$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A},$$

т. е. электрическое поле создается зарядами и изменением во времени магнитного поля; поле магнитной индукции имеет соленоидальный характер. Среда, в которой происходят электрические и

связанные с ними магнитные явления, характеризуется диэлектрической проницаемостью, магнитной проницаемостью и проводимостью. Связь векторов D и E , B и H определяется свойствами среды. В вакууме

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H},$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \left(\frac{\Phi}{\text{М}} \right) \quad \text{— электрическая постоянная;}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{\Gamma_H}{\text{М}} \right) \quad \text{— магнитная постоянная.}$$

В зависимости от значения удельной проводимости среды делятся на

- проводники 10^4 См/м (сиemens на метр),
- полупроводники $10^{-10} < \sigma < 10^4 \text{ См/м}$,
- диэлектрики $\sigma < 10^{-10} \text{ См/м}$

Проводники характеризуются наличием свободных зарядов, которые могут свободно перемещаться под действием электрического поля, при этом создается ток проводимости. В металлических проводниках это электроны, в жидких электролитах — ионы.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}.$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}^{\text{ст}}),$$

$\mathbf{E}^{\text{ст}}$ — напряженность поля сторонних ЭДС, имеющих неэлектрическое происхождение, которое также вызывает ток проводимости. Если проводимость σ не

$$\sigma = \sigma(\mathbf{E}, \mathbf{H}).$$

Диэлектрики характеризуются наличием связанных зарядов, входящих в состав нейтральных молекул диэлектриков. Под действием электрического поля происходит смещение ядра атома, обладающего положительным зарядом, и искажение орбит отрицательных электронов. При этом

центр тяжести отрицательных зарядов уже не совпадает с положительным зарядом ядра. Такая система эквивалентна диполю.

$$\mathbf{p}_\varepsilon = q\mathbf{l}. \quad (1.3)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{D} - \varepsilon_0 \mathbf{E}. \quad (1.4)$$

$$\mathbf{P} = \lim \frac{\Delta \mathbf{p}_\varepsilon}{\Delta V} = \sum_{i=1}^n q_i \mathbf{l}_i, \quad (1.5)$$

где $\Delta \mathbf{p}_\varepsilon$ — вектор электрического момента объема ΔV ,
 n — число диполей в единице объема.

Если рассматривать связь зарядов в диполе как упругую, то

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_\varepsilon \mathbf{E}, \quad (1.6)$$

χ_ε — безразмерный коэффициент, называемый электрической восприимчивостью.

$$\mathbf{D} = (1 + \chi_\varepsilon) \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon_a \mathbf{E},$$

где ε_a — коэффициент пропорциональности (Ф/м), называемый абсолютной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_a = \varepsilon \varepsilon_0.$$

Здесь ε — относительная диэлектрическая проницаемость.

$$\chi_\varepsilon = \chi_\varepsilon(E), \quad \varepsilon_a = \varepsilon_a(E).$$

$$D \gg \varepsilon_0 E \text{ и } \varepsilon \gg 1.$$

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков может составлять несколько тысяч единиц и $\varepsilon = \varepsilon(E)$. Пример - титанат бария.

Магнетики — это среды, способные намагничиваться. Аналогично вектору поляризации вектор намагниченности \mathbf{M} (А/м) определяется выражением

$$\mathbf{M} = \lim \frac{\Delta \mathbf{p}_M}{\Delta V} = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_{Mai} = \chi_M \mathbf{H},$$

где $\Delta \mathbf{p}_M$ — вектор магнитного момента объема ΔV ;

\mathbf{p}_{Mai} — магнитный момент атома;

n — число атомов в единице объема.

Вектор магнитной индукции определяется выражением

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_a \mathbf{H},$$

μ_a — абсолютная магнитная проницаемость вещества,

$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$ — относительная магнитная проницаемость

вещества.

Магнетики делят на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

У **диамагнетиков** магнитный момент атома, определяемый магнитными моментами электронов, при отсутствии внешнего магнитного поля $\mathbf{p}_{Mai} = 0$.

У **парамагнетиков** и в отсутствие внешнего поля

$$\mathbf{p}_{Mai} \neq 0.$$

В ферромагнетиках существуют отдельные микроскопические области (домены) с линейными размерами порядка 10–3 см.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_a \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_a \mathbf{H}, \\ \mathbf{J} &= \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{E}^{\text{CT}}). \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Если анизотропия проявляется в магнитном поле (анизотропный магнетик), то

$$B_i = \mu_0 \mu_{ik} H_k.$$

Аналогично описывается анизотропия диэлектрических свойств и проводимости

$$D_i = \varepsilon_0 \varepsilon_{ik} E_k,$$

$$J_i = \sigma_{ik} (E_k + E_k^{\text{CT}}).$$

В случае анизотропных сред векторы \mathbf{D} , \mathbf{J} и \mathbf{B} соответственно не параллельны \mathbf{E} и \mathbf{H} .

2. Классификация магнетиков. Намагниченность насыщения.

Магнетики делят на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

У **диамагнетиков** магнитный момент атома, определяемый магнитными моментами электронов, при отсутствии внешнего магнитного поля $\mathbf{p}_{Mai} = 0$.

У **парамагнетиков** и в отсутствие внешнего поля

$$\mathbf{p}_{Mai} \neq 0.$$

В ферромагнетиках существуют отдельные микроскопические области (домены) с линейными размерами порядка 10–3 см.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_a \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_a \mathbf{H}, \\ \mathbf{J} &= \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{E}^{ct}). \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Если анизотропия проявляется в магнитном поле (анизотропный магнетик), то

$$B_i = \mu_0 \mu_{ik} H_k.$$

Аналогично описывается анизотропия диэлектрических свойств и проводимости

$$D_i = \varepsilon_0 \varepsilon_{ik} E_k,$$

$$J_i = \sigma_{ik} (E_k + E_k^{ct}).$$

В случае анизотропных сред векторы \mathbf{D} , \mathbf{J} и \mathbf{B} соответственно не параллельны \mathbf{E} и \mathbf{H} .

Намагниченность насыщения – состояние ферромагнетика, при котором его намагниченность достигает предельного значения J_m , не меняющегося при дальнейшем увеличении напряженности намагничивающего поля. При этом образец состоит как бы из одного домена с намагниченностью насыщения, направленной по полю.

3. Диэлектрик в электрическом поле. Индуцированная поляризация.
4. Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости.
5. Классификация электромагнитных полей.
6. Классификация электромагнитных волн.
7. Волновые уравнения для напряженностей поля.
8. Интегральные уравнения электромагнитного поля.
9. Дифференциальные уравнения электромагнитного поля.
10. Уравнения непрерывности в интегральной и дифференциальной форме.
11. Волновые уравнения для электромагнитных потенциалов поля.
12. Решения уравнений для запаздывающих потенциалов.
13. Теорема единственности решений уравнений Максвелла.
14. Граничные условия для нормальных составляющих электромагнитного поля.
15. Граничные условия для тангенциальных составляющих электромагнитного поля.
16. Граничные условия Леонтовича.
17. Теорема Умова-Пойнтинга.
18. Вектор Пойнтинга. Баланс энергии.
19. Комплексная теорема Умова - Пойнтинга
20. Электрический резонанс.
21. Излучение электрического диполя Герца. Вывод общих выражений для напряженностей электрического и магнитного полей.
22. Излучение электрического диполя Герца. Диаграмма излучения.
23. Излучение электрического диполя Герца. Особенности полей ближней и дальней зон.
24. Фазовая и групповая скорости электромагнитной волны.
25. Поляризация электромагнитных волн.
26. Распространение плоской электромагнитной волны в безграничной изотропной среде с потерями. Дисперсия.
27. Распространение плоской электромагнитной волны в безграничной изотропной среде без потерь.
28. Распространение плоской электромагнитной волны в анизотропной ферромагнитной среде при продольном подмагничивании. Вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея).
29. Распространение электромагнитной волны в анизотропной ферромагнитной среде при поперечном подмагничивании. Двойное лучепреломление (Эффект Коттона-Мутона).
30. Распространение электромагнитной волны в изотропной плазме.
31. Распространение электромагнитной волны в плазме с продольным подмагничиванием.
32. Распространение электромагнитной волны в плазме с поперечным подмагничиванием.
33. Переход электромагнитной волны через плоскопараллельную диэлектрическую пластину.
34. Нормальное падение на границу раздела двух сред. Коэффициент стоячей волны.
35. Наклонное падение на границу раздела двух сред без потерь.

36. Формулы Френеля для горизонтально-поляризованной волны.
37. Формулы Френеля для вертикально-поляризованной волны.
38. Полное прохождение электромагнитной волны при наклонном падении на границу раздела сред без потерь. Угол Брюстера.
39. Полное отражение от границы раздела двух диэлектрических сред.
40. Нормальное падение электромагнитного поля на движущуюся плоскость раздела. Эффект Доплера.
41. Направляющие системы.
42. Концепция парциальных волн.
43. Волны типов Е, Н и Т.
44. Основные свойства направляемых электромагнитных волн.
45. Распространение волны типа Е в прямоугольном волноводе.
46. Распространение волны типа Н в прямоугольном волноводе.
47. Волна H_{10} в прямоугольном металлическом волноводе.
48. Распространение волны типа Н в круглом металлическом волноводе.
49. Распространение волны типа Е в круглом металлическом волноводе.
50. Волна H_{11} в круглом металлическом волноводе.
51. Коаксиальный волновод. Характеристики волны основного типа.
52. Микрополосковые линии передачи. Характеристики волны основного типа.
53. Линии передачи с волной типа Т. Основные характеристики.
54. Распространение электромагнитной волны в диэлектрическом волноводе.
55. Потери в волноводах.
56. Поверхностные волны и замедляющие структуры.
57. Поверхностный эффект.
58. Четвертьволновый трансформатор.