

# Конспект билетов

## Общая физика. Оптика

### Содержание

<b>1</b>	<b>Геометрическая оптика. Принцип Ферма, законы преломления и отражения. Полное внутреннее отражение</b>	<b>7</b>
1.1	Геометрическая оптика . . . . .	7
1.2	Принцип Ферма, законы преломления и отражения . . . . .	7
1.3	Полное внутреннее отражение . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Центрированные оптические системы. Тонкая линза. Фокусы и главные плоскости оптической системы. Оптические инструменты: лупа, телескоп и микроскоп</b>	<b>7</b>
2.1	Центрированные оптические системы . . . . .	7
2.2	Фокусы и главные плоскости оптической системы . . . . .	7
2.3	Тонкая линза . . . . .	7
2.4	Оптические инструменты: лупа, телескоп и микроскоп . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Основы фотометрии. Яркость источника, освещённость изображения. Теорема о сохранении яркости оптической системой</b>	<b>7</b>
3.1	Основы фотометрии . . . . .	7
3.2	Яркость источника, освещённость изображения . . . . .	7
3.3	Теорема о сохранении яркости оптической системой . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Волновое уравнение. Монохроматические волны. Уравнение Гельмгольца. Комплексная амплитуда. Волновой вектор, фазовая скорость. Плоские и сферические волны</b>	<b>8</b>
4.1	Волновое уравнение . . . . .	8
4.2	Монохроматические волны . . . . .	8
4.3	Уравнение Гельмгольца . . . . .	8
4.4	Комплексная амплитуда . . . . .	8
4.5	Волновой вектор, фазовая скорость . . . . .	8
4.6	Плоские и сферические волны . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Поток энергии и импульс электромагнитной волны. Давление света</b>	<b>8</b>
5.1	Поток энергии и импульс электромагнитной волны . . . . .	8
5.2	Давление света . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков. Законы преломления и отражения. Зависимость коэффициентов отражения от угла падения. Явление Брюстера</b>	<b>8</b>
6.1	Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков . . . . .	8
6.2	Законы преломления и отражения . . . . .	9
6.3	Зависимость коэффициентов отражения от угла падения . . . . .	9
6.4	Явление Брюстера . . . . .	9
<b>7</b>	<b>Дисперсия волн. Волновой пакет, групповая скорость. Формула Рэлея</b>	<b>9</b>
7.1	Дисперсия волн . . . . .	9
7.2	Волновой пакет, групповая скорость . . . . .	9
7.3	Формула Рэлея . . . . .	9
<b>8</b>	<b>Классическая теория дисперсии света. Аномальная дисперсия. Поглощение света. Дисперсия в плазме и металлах</b>	<b>9</b>
8.1	Классическая теория дисперсии света . . . . .	9
8.2	Аномальная дисперсия . . . . .	9
8.3	Поглощение света . . . . .	9
8.4	Дисперсия в плазме и металлах . . . . .	9

<b>9 Постоянный ток в замкнутых электрических цепях. Электродвижущая сила. Закон Ома для участка цепи. Правила Кирхгофа. Работа и мощность постоянного тока</b>	<b>10</b>
9.1 Постоянный ток в замкнутых электрических цепях . . . . .	10
9.2 Электродвижущая сила . . . . .	10
9.3 Закон Ома для участка цепи . . . . .	10
9.4 Правила Кирхгофа . . . . .	10
9.5 Работа и мощность постоянного тока . . . . .	10
<b>10 Магнитное поле постоянного тока в вакууме. Вектор магнитной индукции. Сила Лоренца. Сила Ампера. Закон Био–Савара. Теорема о циркуляции магнитного поля в вакууме. Теорема Гаусса для магнитного поля. Магнитное поле прямого провода, соленоида, тороидальной катушки</b>	<b>10</b>
10.1 Магнитное поле постоянного тока в вакууме . . . . .	10
10.2 Вектор магнитной индукции . . . . .	10
10.3 Сила Лоренца . . . . .	10
10.4 Сила Ампера . . . . .	11
10.5 Закон Био–Савара . . . . .	11
10.6 Теорема о циркуляции магнитного поля в вакууме . . . . .	11
10.7 Теорема Гаусса для магнитного поля . . . . .	11
10.8 Магнитное поле прямого провода, соленоида, тороидальной катушки . . . . .	11
<b>11 Магнитный момент тока. Точечный магнитный диполь. Сила и момент сил, действующие на виток с током в магнитном поле. Эквивалентность витка с током и магнитного диполя</b>	<b>11</b>
11.1 Магнитный момент тока . . . . .	11
11.2 Точечный магнитный диполь . . . . .	11
11.3 Сила и момент сил, действующие на виток с током в магнитном поле . . . . .	11
11.4 Эквивалентность витка с током и магнитного диполя . . . . .	12
<b>12 Магнитное поле в веществе. Магнитная индукция и напряжённость поля. Вектор намагниченности. Токи проводимости и молекулярные токи. Теорема о циркуляции магнитного поля в веществе. Граничные условия на границе двух магнетиков. Постоянные магниты</b>	<b>12</b>
12.1 Магнитное поле в веществе . . . . .	12
12.2 Токи проводимости и молекулярные токи . . . . .	12
12.3 Вектор намагниченности . . . . .	12
12.4 Магнитная индукция и напряжённость поля . . . . .	12
12.5 Теорема о циркуляции магнитного поля в веществе . . . . .	12
12.6 Граничные условия на границе двух магнетиков . . . . .	13
12.7 Постоянные магниты . . . . .	13
<b>13 Электромагнитная индукция. Поток магнитного поля. ЭДС индукции в движущихся и неподвижных проводниках. Вихревое электрическое поле. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции в интегральной и дифференциальной формах. Фарадеевская и максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции</b>	<b>13</b>
13.1 Поток магнитного поля . . . . .	13
13.2 Электромагнитная индукция . . . . .	13
13.3 Правило Ленца . . . . .	13
13.4 ЭДС индукции в движущихся и неподвижных проводниках . . . . .	13
13.5 Закон электромагнитной индукции в интегральной и дифференциальной формах . . . . .	13
13.6 Вихревое электрическое поле . . . . .	14
13.7 Фарадеевская и максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции . . . . .	14
<b>14 Коэффициенты само- и взаимной индукции. Теорема взаимности. Взаимная индуктивность двух катушек на общем магнитопроводе. Взаимная энергия токов. Локализация магнитной энергии в пространстве, объёмная плотность магнитной энергии</b>	<b>14</b>
14.1 Коэффициенты само- и взаимной индукции . . . . .	14
14.2 Взаимная индуктивность двух катушек на общем магнитопроводе . . . . .	14
14.3 Теорема взаимности . . . . .	14
14.4 Взаимная энергия токов . . . . .	14
14.5 Локализация магнитной энергии в пространстве, объёмная плотность магнитной энергии . . . . .	14

<b>15 Энергетический метод вычисления сил в магнитном поле. Вычисление сил при постоянном токе и потоке магнитного поля. Магнитные цепи. Подъёмная сила электромагнита</b>	<b>15</b>
15.1 Энергетический метод вычисления сил в магнитном поле . . . . .	15
15.2 Вычисление сил при постоянном токе и потоке магнитного поля . . . . .	15
15.3 Магнитные цепи . . . . .	15
15.4 Подъёмная сила электромагнита . . . . .	15
<b>16 Магнитные свойства вещества. Качественные представления о механизме намагничивания пара- и диамагнетиков. Качественные представления о ферромагнетиках. Ферромагнитный гистерезис</b>	<b>15</b>
16.1 Магнитные свойства вещества . . . . .	15
16.2 Качественные представления о механизме намагничивания пара- и диамагнетиков . . . . .	15
16.3 Качественные представления о ферромагнетиках . . . . .	15
16.4 Ферромагнитный гистерезис . . . . .	15
<b>17 Магнитные свойства сверхпроводников I рода, эффект Мейсснера. Сверхпроводящий шар в магнитном поле. Метод изображений для сверхпроводников</b>	<b>16</b>
17.1 Магнитные свойства сверхпроводников I рода, эффект Мейсснера . . . . .	16
17.2 Сверхпроводящий шар в магнитном поле . . . . .	16
17.3 Метод изображений для сверхпроводников . . . . .	16
<b>18 Относительный характер электрического и магнитного полей. Сила Лоренца. Преобразование <math>E</math> и <math>B</math> при смене системы отсчёта (при <math>v \ll c</math>). Поле равномерно движущегося точечного заряда</b>	<b>16</b>
18.1 Относительный характер электрического и магнитного полей . . . . .	16
18.2 Сила Лоренца . . . . .	16
18.3 Поле равномерно движущегося точечного заряда . . . . .	16
18.4 Преобразование $E$ и $B$ при смене системы отсчёта (при $v \ll c$ ) . . . . .	16
<b>19 Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Циклотронная частота и ларморовский радиус. Дрейф в скрещенных однородных полях</b>	<b>16</b>
19.1 Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях . . . . .	16
19.2 Циклотронная частота и ларморовский радиус . . . . .	17
19.3 Дрейф в скрещенных однородных полях . . . . .	17
<b>20 Эффект Холла, влияние магнитного поля на проводящие свойства сред</b>	<b>17</b>
<b>21 Магнитное действие переменного электрического поля. Ток смещения</b>	<b>17</b>
21.1 Ток смещения . . . . .	17
21.2 Магнитное действие переменного электрического поля . . . . .	17
<b>22 Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной форме. Граничные условия. Материальные уравнения</b>	<b>18</b>
22.1 Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной форме . . . . .	18
22.2 Граничные условия . . . . .	18
22.3 Материальные уравнения . . . . .	18
<b>23 Энергия переменного электромагнитного поля. Поток электромагнитной энергии, теорема Пойнтинга. Примеры применения теоремы Пойнтинга</b>	<b>18</b>
23.1 Энергия переменного электромагнитного поля . . . . .	18
23.2 Поток электромагнитной энергии, теорема Пойнтинга . . . . .	18
23.3 Примеры применения теоремы Пойнтинга . . . . .	18
<b>24 Квазистационарные электрические цепи, условие квазистационарности. Зарядка и разрядка конденсатора. Установление тока в катушке индуктивности. Интегрирующие и дифференцирующие цепочки</b>	<b>18</b>
24.1 Квазистационарные электрические цепи, условие квазистационарности . . . . .	18
24.2 Зарядка и разрядка конденсатора . . . . .	19
24.3 Установление тока в катушке индуктивности . . . . .	19
24.4 Интегрирующие и дифференцирующие цепочки . . . . .	19

<b>25 Свободные колебания в линейных системах. Колебательный RLC-контур. Коэффициент затухания, логарифмический декремент и добротность. Энергетический смысл добротности</b>	<b>19</b>
25.1 Свободные колебания в линейных системах. Колебательный RLC-контур . . . . .	19
25.2 Коэффициент затухания, логарифмический декремент и добротность . . . . .	19
25.3 Энергетический смысл добротности . . . . .	19
<b>26 Вынужденные колебания под действием синусоидальной силы. Амплитудная и фазовая характеристики. Резонанс. Ширина резонанса и ее связь с добротностью. Процесс установления вынужденных колебаний, биения</b>	<b>19</b>
26.1 Вынужденные колебания под действием синусоидальной силы . . . . .	19
26.2 Амплитудная и фазовая характеристики . . . . .	20
26.3 Резонанс . . . . .	20
26.4 Ширина резонанса и ее связь с добротностью . . . . .	20
26.5 Процесс установления вынужденных колебаний, биения . . . . .	20
<b>27 Установившиеся колебания в цепи переменного тока. Комплексная форма представления колебаний. Векторные диаграммы. Комплексное сопротивление (импеданс). Правила Кирхгофа для переменных токов. Работа и мощность переменного тока</b>	<b>20</b>
27.1 Установившиеся колебания в цепи переменного тока . . . . .	20
27.2 Комплексная форма представления колебаний . . . . .	20
27.3 Векторные диаграммы . . . . .	21
27.4 Комплексное сопротивление (импеданс) . . . . .	21
27.5 Правила Кирхгофа для переменных токов . . . . .	21
27.6 Работа и мощность переменного тока . . . . .	21
<b>28 Спектральное разложение электрических сигналов. Спектр одиночного прямоугольного импульса и периодической последовательности импульсов. Вынужденные колебания под действием произвольной силы. Соотношение неопределённостей</b>	<b>21</b>
28.1 Спектральное разложение электрических сигналов . . . . .	21
28.2 Спектр одиночного прямоугольного импульса и периодической последовательности импульсов	21
28.3 Вынужденные колебания под действием произвольной силы . . . . .	21
28.4 Соотношение неопределённостей . . . . .	22
<b>29 Спектральный анализ линейных систем. Частотная характеристика и импульсный отклик системы. Колебательный контур как спектральный прибор. Интегрирующая и дифференцирующая цепочки как высокочастотный и низкочастотный фильтры</b>	<b>22</b>
29.1 Спектральный анализ линейных систем. Колебательный контур как спектральный прибор .	22
29.2 Частотная характеристика и импульсный отклик системы . . . . .	22
29.3 Интегрирующая и дифференцирующая цепочки как высокочастотный и низкочастотный фильтры . . . . .	22
<b>30 Модуляция и детектирование сигналов. Амплитудная и фазовая модуляции. Спектры гармонически модулированных по фазе и амплитуде сигналов. Квадратичное детектирование сигналов</b>	<b>22</b>
30.1 Модуляция и детектирование сигналов . . . . .	22
30.2 Амплитудная и фазовая модуляции . . . . .	22
30.3 Спектры гармонически модулированных по фазе и амплитуде сигналов . . . . .	23
30.4 Квадратичное детектирование сигналов . . . . .	23
<b>31 Электрические флуктуации. Тепловой шум. Тепловые флуктуации в колебательном контуре. Интенсивность теплового шума, формула Найквиста</b>	<b>23</b>
31.1 Электрические флуктуации. Тепловой шум . . . . .	23
31.2 Тепловые флуктуации в колебательном контуре . . . . .	23
31.3 Интенсивность теплового шума, формула Найквиста . . . . .	23
<b>32 Электрические флуктуации. Дробовой шум. Интенсивность дробового шума, закон <math>\sqrt{N}</math>, формула Шоттки</b>	<b>23</b>
32.1 Электрические флуктуации. Дробовой шум . . . . .	23
32.2 Интенсивность дробового шума, закон $\sqrt{N}$ , формула Шоттки . . . . .	23

<b>33 Параметрическое возбуждение колебаний. Условие параметрического резонанса</b>	<b>24</b>
33.1 Параметрическое возбуждение колебаний . . . . .	24
33.2 Условие параметрического резонанса . . . . .	24
<b>34 Автоколебания в электрических цепях. Положительная обратная связь. Условие самовозбуждения</b>	<b>24</b>
34.1 Автоколебания в электрических цепях . . . . .	24
34.2 Положительная обратная связь . . . . .	24
34.3 Условие самовозбуждения . . . . .	24
<b>35 Волновое уравнение как следствие уравнений Максвелла. Электромагнитные волны в однородном диэлектрике, их поперечность и скорость распространения</b>	<b>24</b>
35.1 Волновое уравнение как следствие уравнений Максвелла . . . . .	24
35.2 Электромагнитные волны в однородном диэлектрике, их поперечность и скорость распространения . . . . .	24
<b>36 Монохроматические волны. Комплексная амплитуда волны. Плоская электромагнитная волна. Приближение сферической волны. Связь полей <math>E</math> и <math>B</math> в плоской электромагнитной волне. Стоячие и бегущие волны. Отражение волн от идеального проводника</b>	<b>25</b>
36.1 Монохроматические волны . . . . .	25
36.2 Комплексная амплитуда волны . . . . .	25
36.3 Плоская электромагнитная волна . . . . .	25
36.4 Приближение сферической волны . . . . .	25
36.5 Связь полей $E$ и $B$ в плоской электромагнитной волне . . . . .	25
36.6 Стоячие и бегущие волны . . . . .	25
36.7 Отражение волн от идеального проводника . . . . .	25
<b>37 Поток энергии в электромагнитной волне. Давление излучения. Электромагнитный импульс</b>	<b>25</b>
37.1 Поток энергии в электромагнитной волне . . . . .	25
37.2 Электромагнитный импульс . . . . .	26
37.3 Давление излучения . . . . .	26
<b>38 Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков. Формулы Френеля. Явление Брюстера. Полное внутреннее отражение</b>	<b>26</b>
38.1 Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков . . . . .	26
38.2 Полное внутреннее отражение . . . . .	26
38.3 Формулы Френеля . . . . .	26
38.4 Явление Брюстера . . . . .	26
<b>39 Излучение электромагнитных волн. Зависимость интенсивности дипольного излучения от частоты, диаграмма направленности</b>	<b>26</b>
39.1 Излучение электромагнитных волн . . . . .	26
39.2 Зависимость интенсивности дипольного излучения от частоты, диаграмма направленности . . . . .	26
<b>40 Линии передачи энергии. Двухпроводная линия, коаксиальный кабель. Скорость волны, волновое сопротивление. Коэффициент стоячей волны. Согласованная нагрузка</b>	<b>27</b>
40.1 Линии передачи энергии . . . . .	27
40.2 Двухпроводная линия, коаксиальный кабель . . . . .	27
40.3 Скорость волны, волновое сопротивление . . . . .	27
40.4 Согласованная нагрузка . . . . .	27
40.5 Коэффициент стоячей волны . . . . .	27
<b>41 Электромагнитные волны в прямоугольном волноводе. Простейшие типы волн в волноводе прямоугольного сечения. Дисперсионное уравнение, критическая частота, длина волны и фазовая скорость волны в волноводе. Объёмные электромагнитные резонаторы</b>	<b>27</b>
41.1 Электромагнитные волны в прямоугольном волноводе . . . . .	27
41.2 Простейшие типы волн в волноводе прямоугольного сечения . . . . .	28
41.3 Дисперсионное уравнение, критическая частота, длина волны и фазовая скорость волны в волноводе . . . . .	28
41.4 Объёмные электромагнитные резонаторы . . . . .	28

<b>42 Квазистационарное проникновение электрического и магнитного полей в проводящую среду. Скин-эффект. Глубина скин-слоя для постоянного и переменного полей</b>	<b>28</b>
42.1 Квазистационарное проникновение электрического и магнитного полей в проводящую среду.	
Скин-эффект . . . . .	28
42.2 Глубина скин-слоя для постоянного и переменного полей . . . . .	28
<b>43 Плазма. Дебаевский радиус экранирования. Плазменные колебания, плазменная частота</b>	<b>28</b>
43.1 Плазма . . . . .	28
43.2 Дебаевский радиус экранирования . . . . .	28
43.3 Плазменные колебания, плазменная частота . . . . .	29
<b>44 Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы. Проникновение электромагнитных волн в плазму</b>	<b>29</b>
44.1 Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы . . . . .	29
44.2 Проникновение электромагнитных волн в плазму . . . . .	29

## 1 Геометрическая оптика. Принцип Ферма, законы преломления и отражения. Полное внутреннее отражение

### 1.1 Геометрическая оптика

**Опр** *Геометрическая оптика*

Раздел оптики, изучающий законы распространения света без учёта его волновых свойств

### 1.2 Принцип Ферма, законы преломления и отражения

По тексту

Вторую формулировку принципа Ферма игнорировать

По тексту

### 1.3 Полное внутреннее отражение

В какой-то момент, при переходе в более оптически плотную среду, преломлённый луч пропадает

По тексту

## 2 Центрированные оптические системы. Тонкая линза. Фокусы и главные плоскости оптической системы. Оптические инструменты: лупа, телескоп и микроскоп

### 2.1 Центрированные оптические системы

**Опр** *Центрированная оптическая система*

Совокупность преломляющих и отражающих поверхностей с осью симметрии – оптической осью

По тексту

### 2.2 Фокусы и главные плоскости оптической системы

По тексту

### 2.3 Тонкая линза

По тексту. Формулы тонкой линзы и обобщённую формулу тонкой линзы не выводить

### 2.4 Оптические инструменты: лупа, телескоп и микроскоп

Чтобы продемонстрировать преимущества лупы, надо нарисовать изображение предмета в тонкой линзе, а затем найти Г. При рассматривании вплотную к лупе, оптические силы хрусталика и линзы складываются и получаем  $+1$  к Г

По тексту

## 3 Основы фотометрии. Яркость источника, освещённость изображения. Теорема о сохранении яркости оптической системой

### 3.1 Основы фотометрии

По тексту

### 3.2 Яркость источника, освещённость изображения

По тексту

### 3.3 Теорема о сохранении яркости оптической системой

По тексту Назарчук

## 4 Волновое уравнение. Монохроматические волны. Уравнение Гельмгольца. Комплексная амплитуда. Волновой вектор, фазовая скорость. Плоские и сферические волны

### 4.1 Волновое уравнение

По тексту

### 4.2 Монохроматические волны

**Опр Волна**

Изменение некоторой совокупности физических величин (характеристик некоторого физического поля или материальной среды), которое способно перемещаться, удаляясь от места своего возникновения, или колебаться внутри ограниченных областей пространства

**Опр Монохроматическая волна**

Строго гармоническая (синусоидальная) волна, в спектре которой наличествует всего одна составляющая по частоте (постоянная, как и амплитуда). Такая волна на практике не существует, но является удобной физической моделью для теоретического описания различных (электромагнитных, акустических и других) явлений волновой природы

### 4.3 Уравнение Гельмгольца

По тексту

### 4.4 Комплексная амплитуда

По тексту

### 4.5 Волновой вектор, фазовая скорость

**Опр Волновое число**

Быстрота роста фазы волны  $\varphi$  по координате в пространстве:  $k = \frac{d\varphi}{dx}$

По тексту

### 4.6 Плоские и сферические волны

По тексту

## 5 Поток энергии и импульс электромагнитной волны. Давление света

### 5.1 Поток энергии и импульс электромагнитной волны

При помещении вещества в электрическое поле происходит пространственное перераспределение заряда

**Опр Диэлектрик**

### 5.2 Давление света

**Опр Поляризация**

## 6 Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков. Законы преломления и отражения. Зависимость коэффициентов отражения от угла падения. Явление Брюстера

### 6.1 Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков

**Опр Поляризация**



Явление направленного колебания векторов напряжённости электрического поля  $E$  или напряжённости магнитного поля  $H$

По тексту

## 6.2 Законы преломления и отражения

По тексту, как и в первом билете

## 6.3 Зависимость коэффициентов отражения от угла падения

Игнорируя коэффициенты преломления, выведем коэффициенты отражения.

1. Запишем начальные условия и всякие законы сохранения
2. Преобразуем, используя коэффициенты.
3. Выразим эти коэффициенты через начальные условия

## 6.4 Явление Брюстера

По тексту теория, а по тексту Назарчук вывод формулы

## 7 Дисперсия волн. Волновой пакет, групповая скорость. Формула Рэлея

### 7.1 Дисперсия волн

По тексту

### 7.2 Волновой пакет, групповая скорость

По тексту. При обобщении на произвольное количество волн получаем

**Опр** Волновой пакет

Суперпозиция (наложение) плоских монохроматических волн с близкими значениями частот и волновых векторов

### 7.3 Формула Рэлея

По тексту с привлечением аппарата полной производной

## 8 Классическая теория дисперсии света. Аномальная дисперсия. Поглощение света. Дисперсия в плазме и металлах

### 8.1 Классическая теория дисперсии света

По тексту

### 8.2 Аномальная дисперсия

По тексту с пересказом графика

### 8.3 Поглощение света

По тексту

### 8.4 Дисперсия в плазме и металлах

По тексту, включая части со скоростями и плазменным зеркалом

## 9 Постоянный ток в замкнутых электрических цепях. Электродвижущая сила. Закон Ома для участка цепи. Правила Кирхгофа. Работа и мощность постоянного тока

### 9.1 Постоянный ток в замкнутых электрических цепях

В случае замкнутой цепи закон Ома выглядит привычно

*Закон Ома в интегральной форме*

### 9.2 Электродвижущая сила

*Опр Электродвижущая сила*

*Формальное обозначение интеграла*

### 9.3 Закон Ома для участка цепи

Полагая ток во всей участках цепи одинаковым, из дифференциального закона Ома получим

*Закон Ома для участка цепи*

1. Выразим из дифференциальной формы циркуляцию вектора  $E$ .
2. Введём полное сопротивление участка и ЭДС (может быть как положительным, так и отрицательным)
3. Подставив всё в одно уравнение, получи требуемое

### 9.4 Правила Кирхгофа

*Утв Правила Кирхгофа*

Они доказываются с помощью ЗСЗ и закона Ома для участка цепи

### 9.5 Работа и мощность постоянного тока

В прошлом билете было получено выражение для мощности тока в локальной и интегральной формах. Если учесть наличие ЭДС, можно получить ещё две формулы мощности. Домножив каждую на время, получим работу

## 10 Магнитное поле постоянного тока в вакууме. Вектор магнитной индукции. Сила Лоренца. Сила Ампера. Закон Био–Савара. Теорема о циркуляции магнитного поля в вакууме. Теорема Гаусса для магнитного поля. Магнитное поле прямого провода, соленоида, тороидальной катушки

### 10.1 Магнитное поле постоянного тока в вакууме

*Опр Магнитное поле*

### 10.2 Вектор магнитной индукции

*Опр Вектор магнитной индукции*

*Вектор, определяющий силу, действующую на движущийся заряд и характеризующий магнитное поле*

### 10.3 Сила Лоренца

*Опр Сила Лоренца*

## 10.4 Сила Ампера

**Опр** *Сила Ампера*

**Закон** *Ампера*

Нетрудно показать эквивалентность разных выражений для сил в законе Ампера, а также, связь сил Лоренца и Ампера

## 10.5 Закон Био–Савара

**Закон** *Био–Савара*

Он экспериментальный и тоже формулируется для линейного и объёмного элемента тока

## 10.6 Теорема о циркуляции магнитного поля в вакууме

Если взять закон Био–Савара и произвести с ним преобразования по законам векторного анализа, то можно получить векторный потенциал и показать, что он биздивергентен

По аналогии с  $\varphi$ , можно получить

**Th** *О циркуляции магнитного поля в вакууме в дифференциальной форме*

Воспользовавшись формулой Стокса и перейдя к интегралу по контуру, получим

**Th** *О циркуляции магнитного поля в вакууме в интегральной форме*

## 10.7 Теорема Гаусса для магнитного поля

**Th** *Гаусса для магнитного поля в дифференциальной форме*

**Th** *Гаусса для магнитного поля в интегральной форме*

## 10.8 Магнитное поле прямого провода, соленоида, тороидальной катушки

Найти поле прямого провода можно с помощью закона Био-Савара.

1. Запишем этот закон и перейдём к скалярному выражению, раскрыв векторное произведение
2. Выразив  $dx$  через выражение для  $\tan \alpha$  подставим его в выражение
3. Сделав замену, после интегрирования получим требуемое полке

Поле соленоида и тороидальной катушки можно найти с помощью теоремы о циркуляции, используя, если необходимо, плотность намотки и линейную плотность тока

## 11 Магнитный момент тока. Точечный магнитный диполь. Сила и момент сил, действующие на виток с током в магнитном поле. Эквивалентность витка с током и магнитного диполя

### 11.1 Магнитный момент тока

**Опр** *Магнитный момент*

Он направлен по нормали к плоскости витка

### 11.2 Точечный магнитный диполь

**Опр** *Точечный магнитный диполь*

То же, что и плоская замкнутая проводящая рамка площади  $S$  по которой течёт ток  $I$

### 11.3 Сила и момент сил, действующие на виток с током в магнитном поле

С помощью магнитного момента можно найти момент сил, действующих на магнитный диполь

В однородном магнитном поле на виток с током суммарная действующая сила равна нулю. В неоднородном поле силу легче все найти через потенциальную энергию.

1. Посчитаем работу поля по повороту витка
2. Увидим: она зависит лишь от начальных и конечных состояний, то есть можно ввести потенциальную энергию.

3. Продифференцируем энергию и получим силу
4. При условии отсутствия токов проводимости в среде после преобразований векторного анализа можно дать её более простой вид

### 11.4 Эквивалентность витка с током и магнитного диполя

Возьмём векторный потенциал зарядов, движущихся в ограниченной области как сумму и преобразуем его. Затем, переходя к магнитному полю, увидим эквивалентность магнитного "диполя" и витка с током

## 12 Магнитное поле в веществе. Магнитная индукция и напряжённость поля. Вектор намагниченности. Токи проводимости и молекулярные токи. Теорема о циркуляции магнитного поля в веществе. Граничные условия на границе двух магнетиков. Постоянные магниты

### 12.1 Магнитное поле в веществе

Магнитное поле в веществе создаётся внешним полем и циркулирующими внутри микротоками  
**Опр** *Микрополе*

### 12.2 Токи проводимости и молекулярные токи

**Опр** *Токи проводимости*

**Опр** *Молекулярные токи*

### 12.3 Вектор намагниченности

**Опр** *Вектор намагничивания (намагниченность)*

Она может быть как однородной, так и неоднородной

**Опр** *Поверхностные токи*

Свяжем молекулярные токи с вектором намагничивания.

1. Запишем магнитный момент вещества двумя способами
2. Преобразуем, введём линейную плотность тока.
3. Выберем в веществе произвольный замкнутый контур и возьмём тор вокруг него
4. После преобразований и взятия интеграла получим, что

**Утв** *Молекулярный ток и вектор намагничивания связаны в интегральной форме*

Применив теорему Стокса, получим, что

**Утв** *Молекулярный ток и вектор намагничивания связаны в дифференциальной форме*

### 12.4 Магнитная индукция и напряжённость поля

**Опр** *Напряжённость поля*

### 12.5 Теорема о циркуляции магнитного поля в веществе

Используя связь молекулярного тока и вектор намагничивания в интегральной форме запишем теорему о циркуляции для магнитного поля и получим

**Тх** *О циркуляции магнитного поля в веществе в интегральной форме*

Используя дифференциальные формы справа и слева, можно получить

**Тх** *О циркуляции магнитного поля в веществе в дифференциальной форме*

## 12.6 Граничные условия на границе двух магнетиков

Для  $B_n$  воспользуемся теоремой Гаусса для магнитного поля

Для  $H_\tau$  воспользуемся теоремой о циркуляции

Для  $H_n$  представим  $\tau$  через векторное произведение и с помощью преобразований получим требуемое

## 12.7 Постоянные магниты

**Опр** *Постоянный магнит*

Изделие из материала с высокой остаточной магнитной индукцией, сохраняющее состояние намагниченности в течение длительного времени

Можно посчитать поле на оси постоянного магнита

1. Разобьём магнит на колечки с молекулярными токами и, по сути, получим соленоид.
2. Запишем  $dB_x$  колечка через линейную плотность тока, а затем перейдя к параметризации по углу.
3. Выразим  $dx$  через тангенс угла и подставив в формулу получим приятное выражение для  $dB_x$
4. Взяв интеграл, окончательно найдём поле на оси постоянного магнита
5. При желании можно вернуться к параметризации по координате

Также при желании можно нарисовать график зависимости векторов  $B$  и  $H$  от  $x$ . Не лишним будет и показать картину силовых линий векторов внутри и вне магнита

## 13 Электромагнитная индукция. Поток магнитного поля. ЭДС индукции в движущихся и неподвижных проводниках. Вихревое электрическое поле. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции в интегральной и дифференциальной формах. Фарадеевская и максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции

### 13.1 Поток магнитного поля

**Опр** *Поток магнитного поля*

Это определение было известно нам и ранее

### 13.2 Электромагнитная индукция

Рассмотрим проводящую рамку, по которой течёт электрический ток. После детального анализа поймём, что там возникает ЭДС индукции, которая создаёт ток в отрицательном направлении обхода контура.

**Опр** *Электромагнитная индукция*

Явление возникновения электрического тока, электрического поля или электрической поляризации при изменении магнитного поля во времени или при движении материальной среды в магнитном поле

### 13.3 Правило Ленца

*Правило Ленца*

### 13.4 ЭДС индукции в движущихся и неподвижных проводниках

*Утв* *Правило Ленца верно как в движущихся, так и в неподвижных проводниках*

### 13.5 Закон электромагнитной индукции в интегральной и дифференциальной формах

*Закон Электромагнитной индукции в интегральной форме*

$$\mathcal{E}_i = \int \mathbf{E}_{out} d\mathbf{l}$$

Если преобразовать это выражение, то можно получить более частую формулировку этого закона

*Закон Электромагнитной индукции в дифференциальной форме*

### 13.6 Вихревое электрическое поле

Как видно из прошлого закона,  $E \neq 0$ , поэтому индуцируемое электрическое поле является вихревым

### 13.7 Фарадеевская и максвелловская трактовка явления электромагнитной индукции

Трактовка Фарадея

Трактовка Максвелла

### 14 Коэффициенты само- и взаимоиндукции. Теорема взаимности. Взаимная индуктивность двух катушек на общем магнитопроводе. Взаимная энергия токов. Локализация магнитной энергии в пространстве, объёмная плотность магнитной энергии

#### 14.1 Коэффициенты само- и взаимоиндукции

Опр Коэффициент самоиндукции (индуктивность)

Опр Коэффициент взаимоиндукции

#### 14.2 Взаимная индуктивность двух катушек на общем магнитопроводе

Для примера найдём индуктивность идеального соленоида

А также взаимную индуктивность двух катушек на общем магнитопроводе

Рассмотрев произвольный контур, можно найти формулу для

Утв Магнитная энергия тока

#### 14.3 Теорема взаимности

Th Взаимности

Коэффициенты взаимоиндукции для фиксированной пары витков с током совпадают

1. Посчитаем поток создаваемый на  $i$ -й виток всеми остальными при фиксированном геометрии системы.
2. Посчитаем его дифференциал и подставим в дифференциал энергии системы токов.
3. Возьмём две частные производные второго порядка в разных последовательностях и по теореме Шварца получим требуемое

#### 14.4 Взаимная энергия токов

Опр Взаимная энергия токов

Энергия, с которой витки действуют друг на друга (включает коэффициент взаимондукции)

Если посчитать энергию системы токов, то две группы слагаемых её составляющих сольются в одну красивую сумму

#### 14.5 Локализация магнитной энергии в пространстве, объёмная плотность магнитной энергии

1. Рассмотрим соленоид и посчитаем его энергию, используя выражения для  $H$ ,  $d\Phi$ ,  $B$ .
2. Получим выражение, из которого легко отделяется объём, что говорит о локализации магнитной энергии.
3. Также это позволяет ввести понятие объёмной плотности магнитной энергии и три формулы для неё
4. В более общем случае можно воспользоваться векторным анализом для вывода объёмной плотности энергии

## 15 Энергетический метод вычисления сил в магнитном поле. Вычисление сил при постоянном токе и потоке магнитного поля. Магнитные цепи. Подъёмная сила электромагнита

### 15.1 Энергетический метод вычисления сил в магнитном поле

Известно: сила есть частная производная энергии по обобщённой координате

$$\delta A_{out} = dW + \delta A_{mech}$$

### 15.2 Вычисление сил при постоянном токе и потоке магнитного поля

Для вычисления достаточно выразить  $dW$  из выражения выше и продифференцировать

### 15.3 Магнитные цепи

Опр *Магнитная цепь*

### 15.4 Подъёмная сила электромагнита

Если рассмотреть простую магнитную цепь, найти поле в её зазоре, а по нему  $dW$  и силу, то можно явно показать наличие подъёмной силы у электромагнита

## 16 Магнитные свойства вещества. Качественные представления о механизме намагничивания пара- и диамагнетиков. Качественные представления о ферромагнетиках. Ферромагнитный гистерезис

### 16.1 Магнитные свойства вещества

Опр *Магнитная восприимчивость*

### 16.2 Качественные представления о механизме намагничивания пара- и диамагнетиков

Опр *Парамагнетик*

Представление *Механизм намагничивания парамагнетика*

Опр *Намагниченность насыщения*

Закон *Кюри*

Опр *Постоянная Кюри*

Опр *Диамагнетик*

Представление *Механизм намагничивания диамагнетика*

Опр *Ларморовская частота*

### 16.3 Качественные представления о ферромагнетиках

Опр *Ферромагнетик*

### 16.4 Ферромагнитный гистерезис

Опр *Гистерезис*

Опр *Остаточная намагниченность*

Опр *Поле насыщения*

Опр *Коэрцитивная сила*

Опр *Точка Кюри*

Опр *Домен*

## 17 Магнитные свойства сверхпроводников I рода, эффект Мейсснера. Сверхпроводящий шар в магнитном поле. Метод изображений для сверхпроводников

### 17.1 Магнитные свойства сверхпроводников I рода, эффект Мейсснера

**Опр** *Сверхпроводимость*

**Опр** *Критическая температура*

В отличие от сверхпроводников I рода, у сверхпроводников II рода существует смешанное состояние, при котором поле частично проникает в объём

Таким образом, сверхпроводники можно назвать идеальными ( $B = 0$ ) диамагнетиками

**Эффект Мейсснера**

### 17.2 Сверхпроводящий шар в магнитном поле

1. Пользуясь тем, что поле внутри шара есть ноль, можно записать выражение для  $B_n$  на внешней поверхности, откуда выразить магнитный момент
2. Он совпадёт со случаем электростатики
3. Аналогичный результат можно получить и для  $B_\tau$
4. При желании можно получить граничные условия для сверхпроводника и величину молекулярных токов  $i$

### 17.3 Метод изображений для сверхпроводников

Поле от экранированных сверхпроводящих токов вне сверхпроводника всё равно что поле отражённого диполя (с тем же  $\mathcal{M}$ )

## 18 Относительный характер электрического и магнитного полей. Сила Лоренца. Преобразование $E$ и $B$ при смене системы отсчёта (при $v \ll c$ ). Поле равномерно движущегося точечного заряда

### 18.1 Относительный характер электрического и магнитного полей

При переходе из одной СО в другую, сила на частицу не меняется, поэтому происходит преобразование полей. Это свидетельствует об их относительности

### 18.2 Сила Лоренца

Таким образом сила Лоренца является инвариантом при переходе между СО

### 18.3 Поле равномерно движущегося точечного заряда

Используя БСЛ и выражение для  $E$  можно получить поле равномерно движущегося точечного заряда

### 18.4 Преобразование $E$ и $B$ при смене системы отсчёта (при $v \ll c$ )

Из равенства сил можно найти закон преобразования для  $E$ . Используя поле равномерно движущегося точечного заряда, можно найти  $B$  в неподвижной СО, как и закон преобразования

## 19 Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Циклотронная частота и ларморовский радиус. Дрейф в скрещенных однородных полях

### 19.1 Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях

Рассмотрим разные случаи. В однородном  $E$  движение будет равноускоренным



## 19.2 Циклотронная частота и ларморовский радиус

В однородном  $B$  разложим скорость по двум направлениям и получим равномерную циклоиду

**Опр** Циклотронная частота

**Опр** Ларморовский радиус

В случае  $E \parallel B$  имеем равноускоренную циклоиду

## 19.3 Дрейф в скрещенных однородных полях

В случае скрещенных полей перейдем в удобную СО (где  $E = 0$ ) и найдем скорость этой СО

**Опр** Дрейфовая скорость

Средняя скорость движения частиц, приобретаемая в результате воздействия электрического поля

Получим значения  $E$  и  $B$  в новой СО и проанализируем движение. Получается суперпозиция трёх движений: равномерной циклоиды (2) и дрейфа (+1)

## 20 Эффект Холла, влияние магнитного поля на проводящие свойства сред

Рассмотрим движение носителей заряда в  $B_{out}$ .

**Эффект Холла**

Выясним связь между электрическим полем  $E$  и плотностью тока  $j$  в условиях эффекта Холла

**Опр** Тензор проводимости

Определим его компоненты. Рассмотрим простейший случай: система содержит носители только одного типа (например, электроны), ток течет вдоль  $Ox$ , а магнитное поле направлено вдоль оси  $Oz$ . Магнитное поле действует на движущиеся заряды с силой  $F_y = -qu_x B_z$  по оси  $Oy$ . Ток сможет течь строго вдоль  $Ox$ , если заряды в среде перераспределятся таким образом, чтобы компенсировать магнитную силу

**Опр** Холловское электрическое поле

$$E_y = u_x B_z = \frac{j_x}{nq} B_z$$

**Опр** Подвижность носителей тока

Коэффициент пропорциональности между дрейфовой скоростью носителей заряда и приложенным внешним электрическим полем

**Опр** Обобщенный закон Ома

Второе слагаемое в этой формуле как раз отвечает эффекту Холла - возникновению поперечного направления тока  $E$ . Записывая закон покомпонентно, получим

**Опр** Тензор удельного сопротивления

**Опр** Тензор проводимости в условиях эффекта Холла

## 21 Магнитное действие переменного электрического поля. Ток смещения

### 21.1 Ток смещения

Запишем теорему о циркуляции для магнитного поля и убедимся, что она работает не всегда

**Опр** Ток смещения

Теперь запишем теоремы о циркуляции и Гаусса в новом виде

**Опр** Теорема о циркуляции магнитного поля

### 21.2 Магнитное действие переменного электрического поля

Таким образом, переменное электрическое поле приводит к возникновению токов смещения, которые в свою очередь участвуют в создании магнитного поля

## 22 Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной форме. Граничные условия. Материальные уравнения

### 22.1 Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной форме

**Утв** Уравнения Максвелла состоят из ранее известных нам теорем

**Опр** Система уравнений Максвелла в дифференциальной форме

**Опр** Система уравнений Максвелла в интегральной форме

**Утв** У уравнений Максвелла есть словесные интерпретации

### 22.2 Граничные условия

**Утв** У уравнений Максвелла есть всего 4 граничных условия (все они нам уже знакомы)

### 22.3 Материальные уравнения

**Утв** Система уравнений Максвелла не полна. Но её можно дополнить материальными уравнениями

**Утв** Материальные уравнения

## 23 Энергия переменного электромагнитного поля. Поток электромагнитной энергии, теорема Пойнтинга. Примеры применения теоремы Пойнтинга

### 23.1 Энергия переменного электромагнитного поля

Получим ЗСЭ в пространстве с переменными полями

**Утв** Энергия переменного электромагнитного поля есть сумма двух энергий (магнитного и электрического полей)

### 23.2 Поток электромагнитной энергии, теорема Пойнтинга

По ходу преобразований получили выражение, которое удобно обозначить одним символом. Оно равно потоку электромагнитной энергии (энергия в единицу площади в единицу времени)

**Опр** Вектор Пойнтинга

**Th** Пойнтинга в дифференциальной форме

Используя определение объёмной плотности энергии и теорему Остроградского – Гаусса, получим

**Th** Пойнтинга в интегральной форме

### 23.3 Примеры применения теоремы Пойнтинга

**Утв** Теорему Пойнтинга можно применить для поиска поля внутри конденсатора

**Утв** Теорему Пойнтинга можно применить для поиска потока энергии втекающего в длинный провод (равнозначно, поиска джоулевых потерь)

## 24 Квазистационарные электрические цепи, условие квазистационарности. Зарядка и разрядка конденсатора. Установление тока в катушке индуктивности. Интегрирующие и дифференцирующие цепочки

### 24.1 Квазистационарные электрические цепи, условие квазистационарности

**Опр** Квазистационарная электрическая цепь

По цепи ЭМ сигнал распространяется со скоростью  $c \dots$

**Утв** Условие квазистационарности цепи

## 24.2 Зарядка и разрядка конденсатора

*Опр Зарядка конденсатора*

*Опр Разрядка конденсатора*

## 24.3 Установление тока в катушке индуктивности

Запишем  $\int E_L dl$  для неветвлённой цепи со всеми основными элементами. После рассмотрения каждого интеграла получим дополненное правило Кирхгофа (нам удалось подвязать к исходному катушку индуктивности)

Используя полученное правило, рассмотрим процесс установления тока в катушке и найдём зависимость  $I(t)$

## 24.4 Интегрирующие и дифференцирующие цепочки

*Опр Интегрирующая цепочка*

Рассмотрим две интегрирующие цепочки и обоснуем их название

*Опр Дифференцирующая цепочка*

Рассмотрим две дифференцирующие цепочки и обоснуем их название

## 25 Свободные колебания в линейных системах. Колебательный RLC-контур. Коэффициент затухания, логарифмический декремент и добротность. Энергетический смысл добротности

### 25.1 Свободные колебания в линейных системах. Колебательный RLC-контур

1. Рассмотрим колебательный RLC-контур и запишем для него второе правило Кирхгофа+
2. Пользуясь теорией о решении дифференциальных уравнений, запишем общее решение.
3. Теперь рассмотрим три частных случая

*Случай Слабого затухания*

*Случай Сильного затухания в аperiodическом режиме*

*Случай Критический режим колебаний*

### 25.2 Коэффициент затухания, логарифмический декремент и добротность

Рассмотрим затухание тока в цепи с течением времени

*Опр Коэффициент затухания*

*Опр Логарифмический декремент затухания*

*Опр Характерное время затухания*

*Опр Добротность*

В RLC-контуре со слабым затуханием добротность имеет простую формулу В общем же случае можно показать, что в электрических цепях энергия со временем убывает по закону Джоуля-Ленца

### 25.3 Энергетический смысл добротности

Исходя из определения добротности, можно показать, что она показывает убыль энергии в системе за период колебаний

## 26 Вынужденные колебания под действием синусоидальной силы. Амплитудная и фазовая характеристики. Резонанс. Ширина резонанса и ее связь с добротностью. Процесс установления вынужденных колебаний, биения

### 26.1 Вынужденные колебания под действием синусоидальной силы

Рассмотрим вынужденные колебания в RLC-контуре под действием синусоидального ЭДС генератора

...

Решение  $q(t)$  дифференциального уравнения легче все найти, предварительно перейдя в комплексную плоскость

## 26.2 Амплитудная и фазовая характеристики

**Опр** Амплитудная характеристика контура

**Опр** Фазовая характеристика контура

## 26.3 Резонанс

**Опр** Резонанс

Резкое увеличение амплитуды колебаний при совпадении частоты внешнего воздействия с определённым значениям частоты

## 26.4 Ширина резонанса и ее связь с добротностью

1. Резонанс хорошо виден на графике зависимости  $q(\omega)$
2. Заметим, что  $\frac{q_m}{q_0} = Q$
3. Найдём разность частот (ширину колокола) на высоте  $\frac{q_m}{\sqrt{2}}$ . Для этого надо приравнять  $(\Delta\omega)$  к  $4\omega_i\gamma^2$  (тогда из-под знаменателя и вылезет  $\sqrt{2}$ )
4. Получим, что  $Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$

## 26.5 Процесс установления вынужденных колебаний, биения

Сразу скажем, что в установившемся режиме колебания будут происходить на частоте вынуждающей силы (как в механике)

1. Рассмотрим решение  $q(t)$  при разных значениях параметров
2. В случае  $\omega \neq \omega_0$   $\gamma = 0$  имеем произведение синусов
3. Если строить график решения, то медленный синус будет огибающим, а быстрый будет <биться> между ним
4. В случае малого  $\gamma$  зазор каждый период будет только нарастать
5. В случае большого  $\gamma$  практически сразу наступит установившийся режим
6. При  $\omega = \omega_0$  рассмотрим соответствующий предел и получим актуальное решение  $q(t)$
7. Если бы  $\gamma = 0$ , то амплитуда была бы бесконечной, но в реальности колебания будут ограничены огибающей

## 27 Установившиеся колебания в цепи переменного тока. Комплексная форма представления колебаний. Векторные диаграммы. Комплексное сопротивление (импеданс). Правила Кирхгофа для переменных токов. Работа и мощность переменного тока

### 27.1 Установившиеся колебания в цепи переменного тока

В установившемся режиме колебания становятся вынужденными и происходят на частоте внешнего воздействия (возможно с некоторым сдвигом фаз)

### 27.2 Комплексная форма представления колебаний

**Метод** Комплексных амплитуд

**Опр** Комплексная амплитуда

### 27.3 Векторные диаграммы

Метод комплексных амплитуд имеет геометрическую интерпретацию, которую проще всего показать с помощью векторных диаграмм

### 27.4 Комплексное сопротивление (импеданс)

**Опр** *Импеданс*

**Опр** *Активное сопротивление*

**Опр** *Реактивное сопротивление*

Найдём импеданс каждого элемента в RLC-контуре

### 27.5 Правила Кирхгофа для переменных токов

Запишем известную нам форму правил Кирхгофа. Подставим в него импедансы и сократим на экспоненту: получили новую форму записи

**Правило Кирхгофа I**

**Правило Кирхгофа II**

### 27.6 Работа и мощность переменного тока

1. Запишем мгновенное значение мощности на резисторе.
2. Посчитаем среднюю за период мощность (через интеграл)
3. Другой способ получить то же самое – через метод комплексных амплитуд (не забыв про сдвиг фаз между током и напряжением)

## 28 Спектральное разложение электрических сигналов. Спектр одиночного прямоугольного импульса и периодической последовательности импульсов. Вынужденные колебания под действием произвольной силы. Соотношение неопределённостей

### 28.1 Спектральное разложение электрических сигналов

**Опр** *Комплексная форма ряда Фурье периодической функции*

**Опр** *Коэффициент Фурье*

Ряд Фурье можно обобщить и на случай непериодической функции, определённой на бесконечном временном интервале

**Опр** *Фурье-спектр*

### 28.2 Спектр одиночного прямоугольного импульса и периодической последовательности импульсов

1. Посчитаем периодической последовательности импульсов. Для этого найдём  $c_k$  коэффициент в разложении
2. Поймём, какие же границы будут у интеграла от экспоненты и вычислим его
3. Немного преобразований и коэффициент получен
4. В случае спектра одиночного прямоугольного импульса ситуация проще: сначала считаем Фурье-спектр, а потом и сам интеграл

### 28.3 Вынужденные колебания под действием произвольной силы

Запишем второе правило Кирхгофа и введём линейный оператор ...

**Утв** *Принцип суперпозиции откликов*

**Отклик на суммарное воздействие равен сумме откликов на элементарные**

Таким образом, любую функцию можно представить в виде суперпозиции гармонических, равно как и вычислить суммарное воздействие

## 28.4 Соотношение неопределённостей

1. Рассмотрим одиночный прямоугольный спектр
2. График его Фурье-спектра имеет вид колокола
3. Если мы <сожмём> функцию спектра по  $x$  в  $A$  раз, то есть перейдём к функции  $f_A(x) = f(Ax)$ , то её спектр растянется во столько же раз:  $F_A(k) = \text{const} \cdot F\left(\frac{k}{A}\right)$ , поскольку частота каждой спектральной гармоники  $e^{ikx}$  этого разложения должны будут, очевидно, умножиться на  $A$
4. Эта иллюстрация, строго говоря, хоть и носит довольно частный характер, однако она обнажает физический смысл иллюстрируемого свойства: когда мы сжимаем сигнал, его частоты во столько же раз увеличиваются. Другими словами, невозможно произвольно сконцентрировать как функцию, так и её преобразование Фурье

## 29 Спектральный анализ линейных систем. Частотная характеристика и импульсный отклик системы. Колебательный контур как спектральный прибор. Интегрирующая и дифференцирующая цепочки как высокочастотный и низкочастотный фильтры

### 29.1 Спектральный анализ линейных систем. Колебательный контур как спектральный прибор

Рассмотрим RLC-контур и запишем для него II правило Кирхгофа и теорему Фурье. Если вынуждающая сила  $\sim e^{i\omega t}$ , то и отклик тоже; подставим в уравнение

**Опр** *Функция отклика*

Благодаря ей получим

**Утв** *Связь между компонентами отклика и сигнала*

**Опр** *Импульсная (дельта) функция*

### 29.2 Частотная характеристика и импульсный отклик системы

Если источник был импульсным, то отклик тоже будет импульсным

**Опр** *Импульсный отклик системы*

**Опр** *Частотная характеристика контура*

### 29.3 Интегрирующая и дифференцирующая цепочки как высокочастотный и низкочастотный фильтры

Можно показать, что интегрирующая цепочка может служить фильтром высоких, а дифференцирующая – низких частот

## 30 Модуляция и детектирование сигналов. Амплитудная и фазовая модуляции. Спектры гармонически модулированных по фазе и амплитуде сигналов. Квадратичное детектирование сигналов

### 30.1 Модуляция и детектирование сигналов

**Опр** *Модулированные колебания*

Существует три типа модуляции

### 30.2 Амплитудная и фазовая модуляции

**Опр** *Амплитудно-модулированный сигнал*

**Опр** *Фазово-модулированный сигнал*

### 30.3 Спектры гармонически модулированных по фазе и амплитуде сигналов

Если найти спектр амплитудно-модулированного сигнала, то он будет состоять из трёх гармоник

Спектр фазово-модулированного сигнала тоже будет состоять из трёх гармоник, но немного других

### 30.4 Квадратичное детектирование сигналов

**Опр Детектирование**

Например, квадратичные детекторы усредняют квадрат функции по времени

Применить детектирование можно как к АМ, так и к ФМ сигналу, как по определению, так и с помощью метода комплексных амплитуд

## 31 Электрические флуктуации. Тепловой шум. Тепловые флуктуации в колебательном контуре. Интенсивность теплового шума, формула Найквиста

### 31.1 Электрические флуктуации. Тепловой шум

**Опр Тепловой шум**

Система без активного сопротивления теплового шума не производит

1. Пусть есть проводник с концентрацией электронов  $n$  в объёме  $V$ .
2. Усредним плотность тока, усреднив каждый её элемент, не забыв, что среднее от среднего есть ноль
3. От плотности тока перейдём к флуктуации полного тока, используя теорию Друде

### 31.2 Тепловые флуктуации в колебательном контуре

Рассмотрев высокочастотный RLC-контур (с малым затуханием) найдём теряем за период энергию, а также, рассеивающую мощность. Полученная формула даёт оценку мощности, рассеиваемой в активном сопротивлении, но с другой стороны, точно такая же мощность затрачивается на создание флуктуации ЭДС. Следовательно, полученная формула даёт выражение для спектра тепловых шумов.

### 31.3 Интенсивность теплового шума, формула Найквиста

Используя формулы для мощности (две), можно получить две формулы Найквиста

**Опр Белый шум**

Стационарный шум, спектральные составляющие которого равномерно распределены по всему диапазону действующих частот

## 32 Электрические флуктуации. Дробовой шум. Интенсивность дробового шума, закон $\sqrt{N}$ , формула Шоттки

### 32.1 Электрические флуктуации. Дробовой шум

**Опр Дробовой шум**

Посчитаем случайный ток от дробового шума

### 32.2 Интенсивность дробового шума, закон $\sqrt{N}$ , формула Шоттки

**Опр Интенсивность**

Дальнейший рассказ лучше вести по билету Ральфа (страница 64)

**Опр формула Шоттки**

### 33 Параметрическое возбуждение колебаний. Условие параметрического резонанса

#### 33.1 Параметрическое возбуждение колебаний

Опр *Параметрические колебательные системы*  
Режим *Вариометра*

#### 33.2 Условие параметрического резонанса

Посчитаем закачку и потери энергии за период  
Условие *Возбуждения колебаний*

### 34 Автоколебания в электрических цепях. Положительная обратная связь. Условие самовозбуждения

#### 34.1 Автоколебания в электрических цепях

Опр *Автоколебания*

#### 34.2 Положительная обратная связь

Опр *Обратная связь*  
Опр *Положительная обратная связь*

Тип обратной связи, при котором изменение выходного сигнала системы приводит к такому изменению входного сигнала, которое способствует дальнейшему отклонению выходного сигнала от первоначального значения, то есть знак изменения сигнала обратной связи совпадает со знаком изменения входного сигнала

Опр *Диод*  
Опр *Триод*  
Опр *Усилитель*

#### 34.3 Условие самовозбуждения

1. Рассмотрим колебания под действием периодических "толчков".
2. Построим график, изображающие действия толчков.
3. Соорудим генератор с обратной связью, построим графики заряда, тока и толчков (внешнего напряжения)
4. Запишем уравнение колебаний и решим его с помощью новых замен

Условие *Самовозбуждения*

### 35 Волновое уравнение как следствие уравнений Максвелла. Электромагнитные волны в однородном диэлектрике, их поперечность и скорость распространения

#### 35.1 Волновое уравнение как следствие уравнений Максвелла

Запишем уравнения Максвелла в частном случае. Посчитаем ротор ротора двумя способами и получим два волновых уравнения

#### 35.2 Электромагнитные волны в однородном диэлектрике, их поперечность и скорость распространения

УТВ  $\vec{k}$   
Единичный вектор в направлении распространения волны  
Можно показать, что  
УТВ *Поперечность электромагнитных волн*



**Электромагнитные волны  $\perp E, H$** **Утв** Векторы  $k, E$  и  $H$  образуют правую тройку**Утв** Поперечность электромагнитных волн

Исходя из анализа размерности, можно найти скорость распространения волны в пространстве

**Опр** Волновое сопротивление**36 Монохроматические волны. Комплексная амплитуда волны. Плоская электромагнитная волна. Приближение сферической волны. Связь полей  $E$  и  $B$  в плоской электромагнитной волне. Стоячие и бегущие волны. Отражение волн от идеального проводника****36.1 Монохроматические волны****Опр** Монохроматическая волна**Опр** Волновое число**36.2 Комплексная амплитуда волны**

Обычную волну можно записать с помощью метода комплексных амплитуд

**Опр** Комплексная амплитуда**36.3 Плоская электромагнитная волна****Утв** Уравнение плоской электромагнитной волны**Опр** Фазовая скорость**36.4 Приближение сферической волны**

Если рассмотреть лапласиан сферических координат и записать волновое уравнение с его решением, то можно увидеть, что амплитуда убывает обратно пропорционально расстоянию

**36.5 Связь полей  $E$  и  $B$  в плоской электромагнитной волне**Через волновое сопротивление можно показать, что  $E \perp B$ , а также, формульную связь**36.6 Стоячие и бегущие волны**

До этого мы рассматривали только бегущие волны, но если сложить бегущие в противоположном направлении волны, то можно получить уравнение стоячей волны

**36.7 Отражение волн от идеального проводника**

Дальнейший рассказ лучше вести по консультации А. В. Гаврикова (билеты 35, 39)

Граничные условия для  $E$  нам известны и очевидны (внутри проводника поля нет). Можно записать граничные условия и для магнитного поля.**37 Поток энергии в электромагнитной волне. Давление излучения. Электромагнитный импульс****37.1 Поток энергии в электромагнитной волне**

Можно показать, что вектор Пойнтинга равен по модулю и задаёт направление потоку энергии в электромагнитной волне

**Опр** Интенсивность излучения

### 37.2 Электромагнитный импульс

**Опр** *Электромагнитный импульс*

Возмущение ЭМ поля, оказывающее влияние на любой материальный объект, находящийся в зоне действия

Таким импульс обладает и поле в вакууме

**Опр** *Плотность импульса*

### 37.3 Давление излучения

Посчитать давление излучения, которое оно оказывает на среду при поглощении, можно, используя граничные условия. Можно найти давление волны на поверхность как идеального, так и любого другого проводника

## 38 Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков. Формулы Френеля. Явление Брюстера. Полное внутреннее отражение

### 38.1 Электромагнитные волны на границе раздела двух диэлектриков

Рассмотрим падающую волну и запишем для неё граничные условия. Получим, два уравнения (на  $\omega$  и  $\vec{k}$ ), из которых следует равенства углов падения и отражения и закон Снеллиуса

### 38.2 Полное внутреннее отражение

**Опр** *Угол полного внутреннего отражения*

### 38.3 Формулы Френеля

**Опр** *Коэффициент отражения*

**Опр** *Коэффициент преломления*

**Опр** *s-поляризация*

**Опр** *p-поляризация*

Записав граничные условия для каждой поляризации, найдём формулы Френеля

### 38.4 Явление Брюстера

В случае p-поляризации возможно явление (эффект) Брюстера, который имеет место для любой среды

**Опр** *Угол Брюстера*

## 39 Излучение электромагнитных волн. Зависимость интенсивности дипольного излучения от частоты, диаграмма направленности

### 39.1 Излучение электромагнитных волн

Дальнейший рассказ можно вести по консультации А. В. Гаврикова (билет 40)

**Опр** *Излучение*

Рассмотрим волну, создаваемую точечным диполем в вакууме

### 39.2 Зависимость интенсивности дипольного излучения от частоты, диаграмма направленности

Посчитаем мощность излучения и получим

**Утв** *Угловое распределение излучения (диаграмма направленности)*

**Закон** *Рэлея*

Таким образом, поле ускоренно движущегося заряда зависит от промежутка времени до, угла и обратно расстоянию

## 40 Линии передачи энергии. Двухпроводная линия, коаксиальный кабель. Скорость волны, волновое сопротивление. Коэффициент стоячей волны. Согласованная нагрузка

### 40.1 Линии передачи энергии

*Опр Линии передачи энергии*

Чаще всего такие линии неквазистационарны

### 40.2 Двухпроводная линия, коаксиальный кабель

*Опр Двухпроводная линия*

*Опр Телеграфные уравнения*

*Опр Фазовая скорость*

Найдём её для двух примеров длинной линии: коаксиального кабеля и двухпроводной линии

*Опр Волновое уравнение сигнала*

У этого уравнения, как и любого другого дифференциального, есть свои граничные условия

### 40.3 Скорость волны, волновое сопротивление

*Опр Скорость волны*

Скорость распространения возмущения, не может превышать световую и по сути является фазовой

Найдём волновое сопротивление, рассмотрев бегущую волну в двухпроводной линии

*Опр Волновое сопротивление*

### 40.4 Согласованная нагрузка

*Опр Волновая нагрузка*

Такая нагрузка, которая поглощает всю энергию волны (равнозначна отсутствию отражения)

### 40.5 Коэффициент стоячей волны

*Опр Коэффициент стоячей волны*

Его связь с волновым сопротивлением можно попробовать показать через  $E_{fall} + E_{refl}$

*Опр Коэффициент бегущей волны*

## 41 Электромагнитные волны в прямоугольном волноводе. Простейшие типы волн в волноводе прямоугольного сечения. Дисперсионное уравнение, критическая частота, длина волны и фазовая скорость волны в волноводе. Объёмные электромагнитные резонаторы

### 41.1 Электромагнитные волны в прямоугольном волноводе

*Опр Волновод*

Записав упрощённые уравнения Максвелла и граничные условия к ним, получим решение в виде монохроматической волны

*Уравнение Гельмгольца*

## 41.2 Простейшие типы волн в волноводе прямоугольного сечения

Граничным условиям уравнения Гельмгольца не могут быть выполнены одновременно, но могут быть по отдельности. Поэтому в волноводе существует несколько типов волн

**Опр** *H-волна*

**Опр** *E-волна*

**Опр** *Псевдопоперечная волна*

Решение волнового уравнения возможно лишь при некоторых значениях  $\gamma_\lambda$

## 41.3 Дисперсионное уравнение, критическая частота, длина волны и фазовая скорость волны в волноводе

**Опр** *Дисперсионное уравнение*

**Опр** *Критическая частота*

Можно показать, что, например, в простейшем случае прямоугольного волновода она будет связана с его геометрией

**Опр** *Фазовая скорость*

**Опр** *Групповая скорость*

## 41.4 Объёмные электромагнитные резонаторы

**Опр** *Резонатор*

По сути, это волновод с закрытыми входами и выходами (внутри стоячая волна)

**Опр** *Объёмный резонатор*

Спектр волн в таком резонатор будет дополнен

## 42 Квазистационарное проникновение электрического и магнитного полей в проводящую среду. Скин-эффект. Глубина скин-слоя для постоянного и переменного полей

### 42.1 Квазистационарное проникновение электрического и магнитного полей в проводящую среду. Скин-эффект

**Опр** *Скин-эффект*

Рассмотрим распространение переменного  $E$  в проводнике и получим дифференциальное уравнение.

### 42.2 Глубина скин-слоя для постоянного и переменного полей

Найдём распределение тока по объёму проводника

**Опр** *Глубина скин-слоя*

В случае постоянного тока ( $\omega = 0$ ) ток течёт по всему сечению проводника

## 43 Плазма. Дебаевский радиус экранирования. Плазменные колебания, плазменная частота

### 43.1 Плазма

**Опр** *Плазма*

**Опр** *Квазинейтральная плазма*

### 43.2 Дебаевский радиус экранирования

Рассмотрим экранирование заряда в плазме

**Утв** *Потенциал заряда в плазме*

Оценим масштаб, на котором может происходить сильное разделение зарядов

**Опр** *Дебаевский радиус*

**43.3 Плазменные колебания, плазменная частота**

**Опр** *Плазменная частота*

**Опр** *Плазменные колебания*

**44 Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы. Проникновение электромагнитных волн в плазму****44.1 Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы**

Рассмотрим движение электрона в холодной плазме

**Утв** *Диэлектрическая проницаемость холодной плазмы*

**44.2 Проникновение электромагнитных волн в плазму**

Рассмотрим плоскую волну, распространяющуюся в плазме

**Утв** *В плазме могут распространяться только волны с частотой больше плазменной*