

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

Кафедра теоретичної фізики

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
з навчальної дисципліни «ЕЛЕКТРОДИНАМІКА»

для студентів III курсу фізичного факультету і факультету електроніки

ЛЬВІВ — 2011

Електродинаміка. Методичні рекомендації з навчальної дисципліни для студентів за напрямами підготовки 6.040203 Фізика і 6.040204 Прикладна фізика. — Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. — 23 с.

Розробник:

Ровенчак А. А., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри теоретичної фізики

1. Опис навчальної дисципліни

(Витяг з робочої програми навчальної дисципліни
“Електродинаміка”)

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни		
		<i>денна форма навчання</i>		
Кількість кредитів — 7	Галузь знань 0402 Фізико-математичні науки	Нормативна		
Модулів — 2	Напрями підготовки 6.040203 Фізика 6.040204 Прикладна фізика	<i>Рік підготовки:</i> 3-й	<i>Рік підготовки:</i> 3-й	
Змістових модулів — 4				
Загальна кількість годин — 280	Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр	<i>Семестр</i> 5-й	<i>Семестр</i> 6-й	
		<i>Лекції</i> 36 год.	<i>Лекції</i> 34 год.	
<i>Практичні</i> 36 год		<i>Практичні</i> 34 год		
<i>Лабораторні</i> —				
<i>Самостійна робота</i> 70 год		<i>Самостійна робота</i> 70 год		
<i>Вид контролю:</i> залік		<i>Вид контролю:</i> іспит		
Тижневих годин для денної форми навчання: <i>Аудиторних:</i> V семестр – 4 VI семестр – 4 <i>Самостійної роботи студента:</i> V семестр – 4 VI семестр – 4				

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Курс електродинаміки є фундаментальним розділом основного курсу теоретичної фізики.

Мета: формування в майбутнього фізика цілісної картини фізичних явищ, пов'язаних із електромагнітним полем. Це передбачає виклад основ теорії електромагнітних процесів у вакуумі та в середовищі, поглиблення знань, одержаних в загальному курсі «Електрика», засвоєння математичного апарату класичної теорії поля, вивчення теорії електромагнітного поля Максвелла-Лоренца і релятивістської теорії електромагнітного поля. Предмет навчальної дисципліни включає основні поняття та закони класичної та релятивістської електродинаміки, спеціальної теорії відносності, електродинаміки середовища.

Завдання: навчити студентів самостійно виконувати розрахунки, необхідні для розв'язування задач електродинаміки. Студент повинен усвідомити, що численні явища і закони, вивчені в загальному курсі фізики, є наслідками фундаментальних загальних принципів і рівнянь.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен

знати основні поняття предмету; фундаментальні закони електромагнітного поля; основні положення теорії електромагнітного поля у вакуумі; основні закони макроскопічної електродинаміки; основні положення спеціальної теорії відносності та релятивістської електродинаміки.

вміти: отримати рівняння Максвелла у вакуумі та в середовищі; вивести рівняння електромагнітного поля в потенціалах; записати варіаційний принцип для електромагнітного поля; записувати рівняння електродинаміки в 3-вимірному вигляді та в коваріантній формі; сформулювати суть мультипольних розкладів для електромагнітного поля; застосувати методи класичної електродинаміки до розв'язку конкретних задач; розв'язувати основні типи задач класичної електродинаміки та спеціальної теорії відносності.

Для вивчення дисципліни необхідні знання з таких розділів математики і фізики: математичний аналіз, векторний аналіз, диференціальні рівняння, механіка, електрика.

3. Програма навчальної дисципліни*

МОДУЛЬ 1

Змістовий модуль 1. Електродинаміка вакууму

Тема 1. Математичний апарат електродинаміки

1. Короткий історичний нарис розвитку електродинаміки.
[E2, E3]
2. Математичний апарат електродинаміки: елементи векторного числення; δ -функція Дірака. Густина точкового заряду.
[ТР 2П; БТ Гл. I §1-26 Гл. II, Прилож. 1, Гл. XII§4]

Тема 2. Рівняння електродинаміки для зарядів і струмів у вакуумі

1. Рівняння Максвелла як узагальнення дослідних фактів: закон Кулона; вихровий характер магнітного поля; закон Фарадея; джерела магнітного поля; закон Ерстеда; закон Ампера. Перехід до зображення Фур'є.
[ТР §1-6]
2. Потенціали електромагнітного поля. Означення потенціалів, рівняння для потенціалів, градієнтна інваріантність електромагнітного поля, калібрування Кулона і Лоренца, рівняння Д'Аламбера. Поперечний струм.
[ЛЛ2 §18; ТР §17, 28]
3. Закони збереження. Рівняння неперервності як форма запису закону збереження. Закон збереження заряду. Закон збереження енергії. Умови випромінювання. Закон збереження імпульсу. Тензор напружень.
[ЛЛ2 §31; ТР §14]

Тема 3. Вільне електромагнітне поле

1. Рівняння Максвелла для вільного поля. Плоскі, сферичні та інші хвилі. Фазова та групова швидкості.
[ЛЛ2 §46, 47; ТР §39; ФЛС Гл. 20]
2. Поперечність поля і закони збереження.
[ЛЛ2 §47-48]
3. Плоска монохроматична хвиля, поляризація. Закони збереження для вільного поля, енергія та імпульс поля.
[ЛЛ2 §48]
4. Осцилятори поля, функції Лагранжа та Гамільтона вільного поля. Канонічна форма рівнянь поля.
[БРТ §I.31]

* До кожного пункту подано літературу з переліку на стор. 13. При роботі з нею необхідно звертати увагу на таке:

1. У викладанні курсу всюди застосовуються одиниці СГС (в деяких джерелах використовують одиниці СІ).
2. Магнітне поле у вакуумі (яке в електродинаміці середовища має традиційну назву «індукція») позначено **В**, хоч у літературі часто можна натрапити на позначення **Н**.
3. У розділах, де розглядається теорія відносності, використано метрику зі сигнатурою (+, -, -, -), причому нульова координата є часовою, а решта — просторові.

Змістовий модуль 2. Мультипольні розклади. Теорія випромінювання

Тема 4. Статичні поля у вакуумі

1. Рівняння для статичних полів.
[ТР §16-17]
2. Методи розв'язування статичних задач: обернена і пряма задачі електростатики. Приклади розв'язування задач.
[ТР §26]
3. Безпосереднє розв'язування рівнянь для потенціалів. Мультипольні розвинення. Потенціали і поля електричного та магнітного диполів.
[ЛЛ2 §40, 44; ТР §19, 29]
4. Електричний квадрупольний момент. Вищі мультипольні моменти.
[ЛЛ2 §41; Е1]
5. Енергія статичних полів: дві формули для енергії, енергія взаємодії та власна енергія, проблема перенормувань; енергія диполів у зовнішніх полях.
[ЛЛ2 §37, 42; ТР §23-24]

Тема 5. Теорія випромінювання

1. Потенціали Лієнара–Віхерта. Поле рухомого точкового заряду: особливості диференціювання потенціалів Лієнара–Віхерта, обчислення полів.
[ЛЛ2 §63; ТР §46; ФЛС §21.5]
2. Поле і потенціали заряду, який рухається рівномірно.
[ЛЛ2 §38; ФЛС §21.6]
3. Випромінювання точкового заряду.
[БРТ §I.35-36]
4. Сила радіаційного гальмування. Променисте тертя.
[ЛЛ2 §75; ТР §47; БРТ §I.38]
5. Розсіяння електромагнітних хвиль точковим зарядом. Випадок вільного та зв'язаного заряду.
[ЛЛ2 §78; ТР §48; БРТ §I.39-40]
6. Поле системи зарядів на великих віддальх від джерела, близька і хвильова зони.
[ЛЛ2 §66; С §79]
7. Дипольне і квадрупольне випромінювання.
[ЛЛ2 §67, 71; С §80-81]

МОДУЛЬ 2

Змістовий модуль 3. Теорія відносності.

Коваріантна форма рівнянь електродинаміки

Тема 6. Теорія відносності

1. Принципи відносності. Інтервал між подіями. Чотиривимірні простори Мінковського.
[ЛЛ2 §1-3; ТР §65]
2. Перетворення Лоренца: формули Лоренца; додавання швидкостей; власний час і скорочення Лоренца; чотиривимірні вектори і тензори.
[ЛЛ2 §4-7; ТР Гл. 6]
3. Релятивістська механіка вільної частинки: інтеграл дії, функції Лагранжа та Гамільтона, енергія й імпульс; 4-вектор енергії-імпульсу, тензор моменту кількості руху; закони перетворення енергії, імпульсу, моменту кількості руху.
[ЛЛ2 §8-9]
4. Рівняння руху вільної частинки у формі Лагранжа–Ейлера, Гамільтона та Гамільтона–Якобі.
[ЛЛ2 §9]
5. Заряджена частинка в електромагнітному полі: функції Лагранжа і Гамільтона, рівняння руху.
[ЛЛ2 §16-17; ТР §85-87]
6. 4-потенціали поля і закони їх перетворення.
[ЛЛ2 §16-17; ТР §82]
7. Тензор електромагнітного поля: варіаційний принцип для знаходження рівняння руху зарядженої частинки в просторі Мінковського; тензор поля і його властивості; перетворення полів та інваріанти.
[ЛЛ2 §23-25; ТР §80-81]

Тема 7. Коваріантна форма рівнянь електродинаміки

1. Основні співвідношення електродинаміки у просторі Мінковського: 4-струм і перетворення Лоренца; 4-форма рівнянь електродинаміки; варіаційний принцип в теорії поля; інтеграл дії для зарядів і поля; знаходження рівнянь Максвелла з варіаційного принципу.
[ЛЛ2 §27-30; ТР §79]
2. Чотиривимірна форма законів збереження: тензор енергії-імпульсу довільного поля; 4-сила і густина сили; тензори енергії-імпульсу електромагнітного поля та густини частинок.
[ЛЛ2 §32-33; ТР Гл. 8]

Змістовий модуль 4. Електродинаміка середовища

Тема 8. Рівняння макроскопічної електродинаміки

1. Мікро- та макрополя, мікроскопічні рівняння Максвелла–Лоренца. Усереднення мікроскопічних рівнянь: середні значення мікроскопічних полів, зарядів, струмів. Вектори поляризації та намагнічення.
[ТР §1-11, 56-57; БРТ §II.1-2]
2. Поляризація і намагнічення середовища в постійних полях: неполярні і полярні середовища, поле в конденсованому середовищі; діа- та парамагнетизм. Поляризація середовища в змінному полі.
[ТР §58-59]
3. Комплексна діелектрична проникність, дисперсні співвідношення.
[ТР §61; БРТ §II.3-5]
4. Загальна характеристика матеріальних рівнянь. Умови на межі двох середовищ.
[ТР §12]
5. Дисперсні і прозорі середовища, енергія поля в середовищі.
[ТР §14, 61]

Тема 9. Статичні поля в середовищі. Квазістатичні явища.

Електромагнітні хвилі в середовищі. Нелінійні ефекти

1. Рівняння статичних полів, індуковані заряди і струми, індуктивності.
[БРТ §II.10-12]
2. Сили в статичних полях.
[БРТ §II.10-12]
3. Умови квазістатичності та рівняння квазістатичних явищ.
[ЛЛ8 §58; ТР §49; Ф §46]
4. Нормальний та аномальний скін-ефекти.
[ЛЛ8 §60; ТР §52; Ф §47]
5. Рівняння для системи лінійних струмів, комплексний опір.
[ЛЛ8 §61]
6. Магнітне поле в надпровідниках.
[ЛЛ8 §53-55; ТР §36; Ф §31]
7. Плоска монохроматична хвиля в бездисперсному та дисперсному середовищах.
[ЛЛ8 §83; ТР §39]
8. Відбивання і заломлення електромагнітних хвиль на плоскій межі двох середовищ.
[ЛЛ8 §85-86; ТР §46; Ф §43]
9. Хвилі в хвилеводах. Хвилі в анізотропному середовищі.
[ЛЛ8 §90-91; Ф §42]

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Денна форма					
	Усього	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	ср
1	2	3	4	5	6	7
МОДУЛЬ 1						
Змістовий модуль 1. Електродинаміка вакууму.						
Тема 1. Математичний апарат електродинаміки.	18	2	4			12
Тема 2. Рівняння електродинаміки для зарядів і струмів у вакуумі.	48	10	12			26
Тема 3. Вільне електромагнітне поле.	12	6	2			4
Разом – зм. модуль 1	78	18	18			42
Змістовий модуль 2. Мультипольні розклади. Теорія випромінювання.						
Тема 4. Статичні поля у вакуумі.	36	8	10			18
Тема 5. Теорія випромінювання.	28	10	8			10
Разом – зм. модуль 2	64	18	18			28
<i>Разом — модуль 1</i>	<i>142</i>	<i>36</i>	<i>36</i>			<i>70</i>
МОДУЛЬ 3						
Змістовий модуль 3. Теорія відносності. Коваріантна форма рівнянь електродинаміки.						
Тема 6. Теорія відносності.	38	10	10			18
Тема 7. Коваріантна форма рівнянь електродинаміки.	28	6	6			16
Разом – зм. модуль 3	66	16	16			34
Змістовий модуль 4. Електродинаміка середовища.						
Тема 8. Рівняння макроскопічної електродинаміки.	44	10	14			20
Тема 9. Статичні поля в середовищі. Квазістатичні явища. Електромагнітні хвилі в середовищі. Нелінійні ефекти	28	8	4			16
Разом – зм. модуль 4	72	18	18			36
<i>Разом — модуль 2</i>	<i>138</i>	<i>34</i>	<i>34</i>			<i>70</i>
Усього годин	280	70	70			140

5. Теми практичних занять*

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
V семестр		
1	Математичний апарат електродинаміки: елементи векторного числення [БТ Гл. I §1-2]	2
2	Математичний апарат електродинаміки: Застосування δ -функцій [БТ Гл. II, Пр. 1]	2
3	Застосування інтегральних перетворень Фур'є [БТ Гл. XII §4]	2
4	Розв'язування задач електростатики [БТ Гл. II; В §I.1-3]	6
5	Розв'язування задач магнітостатики [БТ Гл. IV-V; В §II.1-3]	6
6	Мультипольні розклади [БТ Гл. II]	6
7	Метод зображень [БТ Гл. III §3; В §I.6]	4
8	Теорія випромінювання [М; БТ Гл. XII]	8
	Разом за V семестр	36
VI семестр		
9	Застосування перетворень Лоренца. [БТ Гл. X §1-2; ЛЛ2 §6]	4
10	Рух релятивістських частинок в зовнішніх полях. [БТ Гл. XI §2; В §IV.3]	2
11	Перетворення потенціалів і полів. [ЛЛ2 §6; В Ч. IV]	2
12	Релятивістська кінематика. [БТ Гл. XI §1; В §IV.1]	4
13	Релятивістська електродинаміка. [БТ Гл. X §3; В §IV.2]	4
14	Електродинаміка діелектриків. [БТ Гл. III §1-2]	6
15	Магнітне поле в середовищі [БТ Гл. V; В §II.4]	4
16	Взаємодія атома з електромагнітним полем. [БТ Гл. VI §1; В §III.3]	2
17	Розрахунок ємностей для різних конфігурацій [БТ Гл. III §2; В §I.4]	2
18	Статичні поля в середовищах: індуковані заряди і струми, сфера і циліндр в однорідних полях [В §II.4-5]	4
	Разом за VI семестр	34
	Разом	70

* Перелік вибраних задач для практичних занять, контрольних робіт та іспиту також подано на стор. 15–22. Його можна використовувати й для самостійної роботи.

6. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
V семестр		
1	Математичний апарат електродинаміки: елементи векторного числення [ТР 2П; БТ Гл. I §1-2]	8
	Застосування δ -функцій. [БРТ ДІV; БТ Гл. II, Прилож. 1]	4
2	Системи одиниць в електродинаміці [БРТ ДV; ТР §15]	2
3	Розв'язування задач електростатики з використанням теореми Гаусса [БТ Гл. II; В Ч. I]	6
4	Розв'язування задач електростатики за допомогою безпосереднього інтегрування розподілу зарядів [БТ Гл. II; В Ч. I]	8
5	Розв'язування задач магнітостатики з використанням теореми Стокса [БТ Гл. IV-V; В Ч. II]	6
6	Розв'язування задач магнітостатики за допомогою безпосереднього інтегрування розподілу струмів [БТ Гл. IV-V; В Ч. II]	8
7	Мультипольні розклади для систем точкових зарядів [БТ Гл. II; ЛЛ2 §40-44; ТР §19, 29]	6
8	Мультипольні розклади для неперервного розподілу зарядів [БТ Гл. II; ЛЛ2 §40-44; ТР §19, 29]	8
9	Метод зображень [БТ Гл. III §3]	4
10	Теорія випромінювання [М; БТ Гл. XII; В §I.6]	10
	Разом за V семестр	70
VI семестр		
11	Застосування перетворень Лоренца. [БТ Гл. X; ЛЛ2 Гл. I]	6
12	Рух релятивістських частинок в зовнішніх полях. [БТ Гл. XI; В Ч. IV]	6
13	Перетворення потенціалів і полів. [В Ч. IV; ФЛС Гл. 26]	6
14	Релятивістська кінематика. [БТ Гл. XI; В §IV.1]	8
15	Релятивістська електродинаміка. [БТ Гл. X §3; В §IV.2]	8
16	Електродинаміка середовища, знаходження полів [БТ Гл. III-V; В Ч. I-II]	14
17	Умови на межі двох середовищ [ТР §12]	8
18	Розрахунки ємності та індуктивності [БТ Гл. III; В §I.4, §II.5]	8
19	Скін-ефект [ЛЛ8 §60; ТР §52; E3]	4
20	Електромагнітні хвилі в середовищі [Ф Гл. 6]	4
	Разом за VI семестр	70
	Разом	140

7. Методи контролю

Контроль засвоєння матеріалу включає поточний контроль (контрольні роботи за чотирма змістовими модулями, по два в кожному семестрі — $2 \times 15 = 30$ балів за семестр), оцінку відповідей та роботи на практичних заняттях (20 балів за семестр) — разом за семестр 50 балів, залік в осінньому семестрі (50 балів) та іспит, що складається з тестової частини ($12 \times 2.5 = 30$ балів) і перевірки теоретичних та практичних знань за допомогою завдань більшого обсягу ($2 \times 10 = 20$ балів) — разом 50 балів. Сумарна оцінка, таким чином, виставляється за 100-бальною шкалою у кожному семестрі.

8. Розподіл балів, що присвоюється студентам

Розподіл балів, які отримують студенти (для заліку), V семестр

Поточне тестування та самостійна робота		Робота на практичних	Підсумковий тест (залік)	Сума
Змістовий модуль 1	Змістовий модуль 2			
T1-3	T4-5			
15	15	20	50	100

Розподіл балів, які отримують студенти (для екзамену), VI семестр

Поточне тестування та самостійна робота		Робота на практичних	Підсумковий тест (екзамен)	Сума
Змістовий модуль 3	Змістовий модуль 4			
T1-3	T4-5			
15	15	20	50	100

Шкала оцінювання: Університету, національна та ECTS

Оцінка в балах	Оцінка ECTS	Визначення	За національною шкалою	
			Екзаменаційна оцінка	Залік
90–100	A	Відмінно	Відмінно	Зараховано
81-89	B	<i>Дуже добре</i>	<i>Добре</i>	
71-80	C	<i>Добре</i>		
61-70	D	<i>Задовільно</i>	<i>Задовільно</i>	
51-60	E	<i>Достатньо</i>		

9. Методичне забезпечення

- [М] *Мигаль В. М.* Випромінювання електромагнітних хвиль: Методичні вказівки до розв'язування задач з вибраних розділів електродинаміки для студентів III курсу фізичного факультету. — Львів : ЛДУ, 1999. — 32 с.

10. Рекомендована література

Базова

- [БРТ] *Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н.* Классическая электродинамика. — Москва : Наука, 1985. — 400 с.
- [ЛЛ2] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика : Учеб. пособие. В 10 т. — Т. II : Теория поля. — 7-е изд., испр. — Москва : Наука, 1988. — 512 с.
- [ЛЛ8] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика : Учеб. пособие. В 10 т. — Т. VIII : Электродинамика сплошных сред. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Наука, 1982. — 621 с.
- [С] *Савельев И. В.* Основы теоретической физики : Учеб. руководство : для вузов. В 2 т. — Т. 1 : Механика и электродинамика. 2-е изд., испр. — Москва : Наука, 1991. — 496 с.
- [ТР] *Терлецкий Я. П., Рыбаков Ю. П.* Электродинамика : Учеб. пособие для студентов физ. спец. университетов. — 2-у изд., перераб. — Москва : Высш. шк., 1990. — 352 с.
- [Ф] *Федорченко А. М.* Теоретична фізика : Підручник : У 2 т. — Т. 1: Класична механіка і електродинаміка. — Київ : Вища шк., 1992. — 535 с.

Допоміжна

- [БТ] *Батыгин В. В., Топтыгин И. Н.* Сборник задач по электродинамике. — Изд. 2-е, испр. и доп. — Москва : Физматгиз, 1970. — 504 с.
- [В] *Векштейн Е. Г.* Сборник задач по электродинамике. — Москва : Высшая школа, 1966. — 288 с.
- [ФЛС] *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. В 10 т. — Т. 6 : Электродинамика. — Москва : Мир, 1966. — 344 с.

11. Інформаційні ресурси

- [E1] Eric Weisstein's World of Physics <http://scienceworld.wolfram.com/physics/>
- [E2] Sketching the History of Classical Electromagnetism <http://history.hyperjeff.net/electromagnetism>
- [E3] Wikipedia. <http://www.wikipedia.org>

Приклад тесту для контролю якості знань студентів

Електродинаміка: Іспит (тестова частина)

Варіант XX Студент _____ Група _____

Завдання № 1. Розрахуйте $\operatorname{div} r$ і вкажіть варіант правильної відповіді.

- 1) 2 2) 1 3) 3 4) 0

Завдання № 2. Густина точкового заряду виражається через

- 1) бета-функцію Ейлера 2) дельта-функцію Дірака
3) тета-функцію Гевісайда 4) пси-функцію (дигамма-функцію)
5) гамма-функцію Ейлера

Завдання № 3. Об'ємна густина потоку енергії електромагнітного поля має вигляд

- 1) $S = (E+B)/4\pi$ 2) $S = c[E,B]/4\pi$ 3) $S = (E,B)/8\pi c$ 4) $S = (E-B)/8\pi$

Завдання № 4. Потенціал точкового заряду величиною q на відстані r дорівнює

- 1) q/r 2) q/r^2 3) q/r^3 4) qr

Завдання № 5. Векторний потенціал магнітного диполя з моментом m має вигляд

- 1) $A(r) = [m,r]/r^3$ 2) $A(r) = q/r$ 3) $A(r) = m/r^2$ 4) $A(r) = (m,r)/r^3$

Завдання № 6. Напруженість електричного поля диполя залежить від відстані r як

- 1) $\sim 1/r^3$ 2) $\sim 1/r$ 3) $\sim 1/r^4$ 4) $\sim r$ 5) $\sim 1/r^2$

Завдання № 7. Умовами випромінювання є такі залежності електричного і магнітного полів від відстані r :

- 1) $\sim 1/r^2$ 2) $\sim r$ 3) $\sim 1/r$ 4) $\sim r^2$

Завдання № 8. Вкажіть на вираз для інтенсивності дипольного випромінювання

- 1) $I = 2\ddot{d}^2/3c^3$ 2) $I = 2e^2c^2$ 3) $I = e^3a^3/2c^2$ 4) $I = 3e^2/2c^3$

Завдання № 9. Релятивістський закон додавання швидкостей має вигляд

- 1) $u = (u' + v) / (1 + u'v/c^2)$ 2) $u = (u' - v) / (1 + u'v)$ 3) $u = (u'v) / (1 + u'v/c^2)$
4) $u = u' + v$

Завдання № 10. Дія, що відповідає взаємодії частинок з електромагнітним полем, має вигляд

- 1) $S = -mc \int ds$ 2) $S = (e/c) \int A_\mu ds$ 3) $S = -(e/c) \int A_\mu dx^\mu$ 4) $S = (c/e) \int A dt$

Завдання № 11. Зв'язок між векторами напруженості H й індукції B магнітного поля має у найпростішому випадку вигляд

- 1) $B = \mu \operatorname{rot} H$ 2) $B = \mu H$ 3) $[B,H] = -\operatorname{grad} \mu$ 4) $H = \mu B$

Завдання № 12. Рівняння Максвелла в середовищі, в яке входять вільні заряди ρ_0 , має вигляд

- 1) $\operatorname{div} D = 4\pi\rho_0$ 2) $\operatorname{grad} \rho_0 = 4\pi E$ 3) $\operatorname{div} E = 4\pi\rho_0$ 4) $\operatorname{rot} D = 4\pi\rho_0$

Вибрані задачі для роботи на практичних, проведення контрольних робіт та іспиту

Електростатика

1. Обчисліть інтеграли $\oint_S \mathbf{r}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{n}) dS$, $\oint_S \mathbf{n}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{r}) dS$, де \mathbf{a} — постійний вектор, \mathbf{n} — орт нормалі до поверхні S .
2. Отримайте вираз для розв'язку $\varphi(\mathbf{r})$ рівняння Пуассона $\Delta\varphi(\mathbf{r}) = -4\pi\rho(\mathbf{r})$, використовуючи пряме й обернене перетворення Фур'є.
3. Знайдіть електричне поле безмежної плити товщиною a , яка рівномірно заряджена по об'єму з густиною ρ .
4. Знайдіть електричне поле кулі радіуса R , заряд у якій розподілений за законом $\rho(r)$, де r — відстань від центра кулі. Проаналізуйте випадки $\rho(r) = \rho_0 = \text{const}$ та $\rho(r) = \rho_0(r/R)^n$.
5. Рівномірно заряджене коло радіуса a має заряд q . Визначте напруженість електричного поля на осі кола.
6. Круглий диск радіуса a рівномірно заряджений з поверхневою густиною σ . Визначте, в якій точці на осі диска напруженість електричного поля дорівнює $\pi\sigma$.
7. Заряд електрона в атомі водню розподілений з об'ємною густиною $\rho(r) = -\frac{e_0}{\pi a^3} e^{-2r/a}$, де a — борівський радіус, $-e_0$ — заряд електрона, r — відстань до ядра. Обчисліть потенціал і напруженість електричного поля в атомі та енергію взаємодії електрона та ядра.
8. Простір між двома концентричними сферами з радіусами R_1 і R_2 , $R_1 < R_2$, заряджений з об'ємною густиною $\rho = \rho_0/r^2$. Визначте потенціал і напруженість електричного поля.
9. Безмежний круговий циліндр радіуса R заряджений з об'ємною густиною $\rho = \rho_0 e^{-\alpha r^2}$. Визначте потенціал і напруженість електричного поля.
10. Безмежний круговий циліндр радіуса R заряджений з об'ємною густиною $\rho = \rho_0 e^{-\alpha r}$. Визначте потенціал і напруженість електричного поля.
11. Знайдіть електричне поле безмежної плити товщиною a , яка рівномірно заряджена по об'єму з густиною ρ .
12. Знайдіть електричне поле кулі радіуса R , заряд у якій розподілений за законом $\rho(r)$, де r — відстань від центра кулі. Проаналізуйте випадки $\rho(r) = \rho_0 = \text{const}$ та $\rho(r) = \rho_0(r/R)^n$.

13. Заряд q рівномірно розподілений по об'єму фігури, яка обмежена двома неконцентричними сферами з радіусами R і r , $R > r$; менша сфера повністю міститься всередині більшої. Відстань між центрами a . Знайдіть напруженість поля всередині меншої сфери.
14. Заряд q рівномірно розподілений по об'єму фігури, яка обмежена двома сферами з радіусами R і r , $R > r$; менша сфера повністю міститься всередині більшої. Відстань між центрами a . Знайдіть напруженість поля поза фігурою.
15. Знайдіть потенціал і напруженість електричного поля рівномірно зарядженого прямолінійного відрізка, що займає на осі z відрізок $[-a; a]$. Повний заряд відрізка q .
16. Заряд розподілений по безмежному простору за законом $\rho = \rho_0 \cos(\alpha x) \cos(\beta y) \sin(\gamma z)$. Знайдіть потенціал електричного поля φ .

Магнітостатика

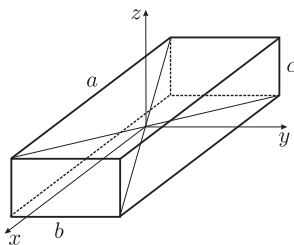
17. По кільцю радіуса R протікає струм I . Знайдіть величину магнітного поля на осі кільця.
18. Знайдіть магнітне поле, створене протіканням струму I по безмежно довгому тонкому провіднику.
19. Лінійний провідник має форму прямокутника зі сторонами $2a$ і $2b$, по якому протікає струм I . Обчисліть напруженість магнітного поля на осі, що проходить через центр прямокутника перпендикулярно до його площини.
20. Струм I протікає по дузі кола радіуса a з центральним кутом α . Обчисліть напруженість магнітного поля в центрі кола.
21. Струм I рівномірно розподілений по поверхні плоского кільця з внутрішнім і зовнішнім радіусами a і b відповідно. Обчисліть напруженість магнітного поля на осі кільця.
22. Лінійний контур зі струмом I складається із двох паралельних напівбезмежних прямих, з'єднаних між собою півколом радіуса a . Обчисліть напруженість магнітного поля в центрі цього півкола.
23. Визначте напруженість магнітного поля, яке створене постійним струмом I , що протікає по безмежному циліндричному провіднику радіуса a .

24. Всередині тонкої провідної циліндричної оболонки радіуса b знаходиться коаксіальний з нею провід радіуса a . По цих провідниках протікають постійні струми однакової величини I у протилежних напрямках. Визначте магнітне поле такої системи в усіх точках простору.

Мультипольні розклади

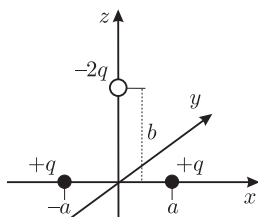
25. Покажіть, що розподіл зарядів $\rho(\mathbf{r}) = -(\mathbf{d} \cdot \nabla)\delta(\mathbf{r})$ описує елементарний диполь з моментом \mathbf{d} , розташований у початку координат.
26. Знайдіть електричне поле диполя на великій відстані від нього. Заряди дорівнюють $\pm q$, відстань між ними a .
27. Провідник має форму еліпсоїда обертання з півсями a та b ($b < a$), вісь обертання — довша. Заряд еліпсоїда q . Визначте потенціал електричного поля, яке створює еліпсоїд у вакуумі.
28. Знайдіть електричний дипольний момент \mathbf{d} і квадрупольний момент Q_{jk} тривісного еліпсоїда з півсями a, b, c . Густина заряду $\rho = \text{const}$.
29. Знайдіть електричне поле на великій відстані від системи зарядів, які розміщені у вершинах квадрата зі стороною a . Однойменні заряди величиною $\pm q$ знаходяться на протилежних вершинах.
30. Знайдіть електричний дипольний момент \mathbf{d} і компоненту Q_{zz} квадрупольного момента кулі радіусом R , якщо густина заряду $\rho(z) = \rho_0(1 + z/R)$, $\rho_0 = \text{const}$. Центр кулі збігається з початком координат.
31. Знайдіть електричний дипольний момент \mathbf{d} і компоненту квадрупольного момента Q'_{zz} , де $Q'_{ij} = \int x'_i x'_j \rho(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$, тривісного еліпсоїда з півсями a, b, c . Густина заряду $\rho(z) = \rho_0 z/c$, $\rho_0 = \text{const}$. Центр еліпсоїда збігається з початком координат.

32.

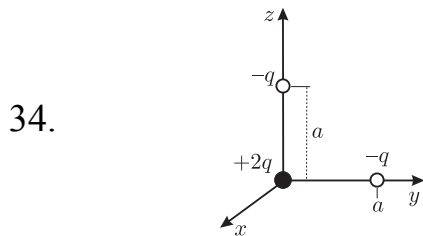


Знайдіть квадрупольний момент прямокутного паралелепіпеда зі сторонами a, b, c , рівномірно зарядженого з густиною $\rho = \text{const}$. Центр паралелепіпеда збігається з початком координат (див. рис).

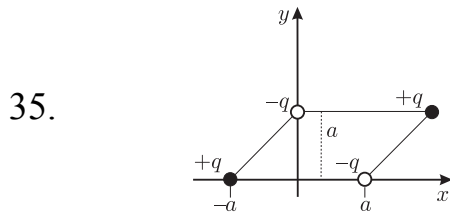
33.



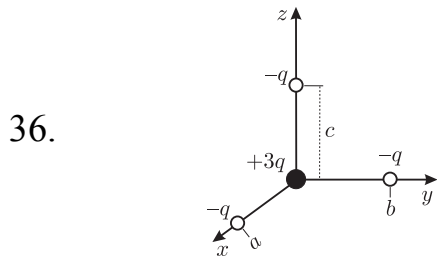
Знайдіть дипольний і квадрупольний моменти системи зарядів величинами $+q, +q, -2q$, розміщених у вершинах рівнобедреного трикутника (див. рис).



Знайдіть дипольний і квадрупольний моменти системи зарядів величинами $+q$, $+q$, $-2q$, розміщених у вершинах рівнобедреного прямокутного трикутника з катетом a (див. рис).



Знайдіть дипольний і квадрупольний моменти системи чотирьох зарядів величинами $\pm q$, які розміщені у вершинах паралелограма (див. рис).



Знайдіть дипольний і квадрупольний моменти системи чотирьох зарядів величинами $-q$, $-q$, $-q$, $+3q$, які розміщені у вершинах трикутної піраміди (див. рис).

Теорія випромінювання

37. Електрон масою m і зарядом e пролітає на великій віддалі a від нерухомого ядра з зарядом $Z|e|$. У безмежно віддалений момент часу $t = -\infty$ абсолютне значення швидкості електрона було v_0 . Нехтуючи викривленням траєкторії, знайдіть енергію \mathcal{E} , яку електрон втрачає за рахунок дипольного випромінювання за час польоту.
38. У класичній моделі атома, запропонованій Резерфордом, електрон масою m і зарядом e обертається по коловій орбіті навколо нерухомого ядра з зарядом $Z|e|$. Знайдіть час T , через який електрон впаде на ядро внаслідок втрати енергії на дипольне випромінювання. У початковий момент часу t_0 електрон знаходився на відстані R від ядра. Обчисліть значення T для випадку атома водню.
39. Лінійний провідник має форму прямокутника зі сторонами $2a$ і $2b$, по якому протікає струм I . Обчисліть напруженість магнітного поля на осі, що проходить через центр прямокутника перпендикулярно до його площини.
40. Найпростіша рамкова антена — це прямокутна рамка зі сторонами a і b по якій тече лінійний струм силою $J = J_0 \cos \omega t$. Визначте середню за період коливань $T = 2\pi/\omega$ інтенсивність дипольного випромінювання.
41. Покажіть, що магнітно-дипольне випромінювання відсутнє в системі, яка складається із двох заряджених частинок, що рухаються з нерелятивістськими швидкостями.

42. Точковий заряд обертається рівномірно по колу радіуса a з кутовою швидкістю $\omega \ll c/a$. Визначте поля випромінювання \mathbf{E} , \mathbf{B} та інтенсивність випромінювання, створеного ним у вакуумі.
43. Частинка масою m і зарядом q може описуватися як гармонічний осцилятор з частотою ω_0 . Враховуючи силу радіаційного тертя, знайдіть середню за період коливань $T = 2\pi/\omega$ інтенсивність дипольного випромінювання цього осцилятора, який здійснює вимушені коливання в зовнішньому електричному полі напруженістю $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos \omega t$.

Релятивістська теорія

44. Виразити компоненти 4-вектора прискорення через тривимірну швидкість і прискорення.
45. Вивести закон перетворення для тривимірного вектора прискорення при переході від однієї системи відліку до іншої.
46. Ракета рухається прямолінійно з постійним прискоренням w_0 у власній системі відліку. Скільки часу (за “земним годинником”) триватиме розгін ракети до швидкості $v = 0.8c$?
47. Узагальніть формули перетворення Лоренца для довільної орієнтації осей координат обох систем відліку відносно напрямку їхнього руху.
48. Виведіть релятивістський закон додавання швидкостей у випадку довільної взаємної орієнтації швидкостей, якщо швидкість руху однієї системи відносно іншої є набагато менша за швидкість світла.
49. Запишіть перетворення Лоренца для симетричного тензора другого рангу.
50. Запишіть перетворення Лоренца для антисиметричного тензора другого рангу.
51. Два однакових стрижні довжиною l_0 (у власній системі відліку) розміщені на одній прямій і рухаються рівномірно і прямолінійно назустріч один одному з однаковими швидкостями v (відносно лабораторної системи відліку). Яка довжина одного зі стрижнів у системі відліку, пов’язаній з іншим?
52. Вважаючи, що при малих швидкостях $p^2 \ll (mc)^2$, де p — імпульс частинки, знайдіть наближену залежність енергії частинки від її імпульсу з точністю до $(\frac{p^2}{m^2 c^2})^2$.

53. Дзеркало рухається зі швидкістю v в напрямку, протилежному до своєї нормалі. На дзеркало падає промінь світла під кутом θ . Визначте напрям відбитої хвилі і зміну частоти світла при відбиванні.
54. Монохроматичне світло частоти ω_0 падає нормально на поверхню плоского дзеркала, яке рухається рівномірно зі швидкістю v в напрямку поширення світла. Знайдіть частоту відбитого світла.
55. Обчислити напруженість електромагнітного поля (\mathbf{E}, \mathbf{B}) , яке створюється у вакуумі точковим зарядом e , що рухається рівномірно і прямолінійно зі швидкістю v .
56. Знайдіть перетворення Лоренца для компонент тензора електромагнітного поля $F^{\mu\nu}$.
57. Чи можливо, вибираючи відповідним чином систему відліку, замість електромагнітного поля отримати тільки електричне (або тільки магнітне) поле?
58. В системі відліку K електричне та магнітне поля взаємно перпендикулярні: $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$. З якою швидкістю відносно системи K має рухатися система K' , щоб в останній було лише електричне або лише магнітне поле?
59. Знайдіть швидкість системи відліку, в якій електричне і магнітне поля паралельні.
60. Враховуючи властивості тензора $F^{\mu\nu}$, отримайте закон перетворення для \mathbf{E}, \mathbf{B} при переході від однієї інерціальної системи відліку до іншої.
61. Знайдіть вираз для інваріанта $F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ через електричне та магнітне поля.
62. Обчисліть потенціали електромагнітного поля, який створюється у вакуумі точковим зарядом e , що рухається рівномірно і прямолінійно зі швидкістю v .

Електродинаміка середовища

63. Безмежна прямолінійна нитка рівномірно заряджена з лінійною густиною λ й оточена однорідним діелектриком з проникністю ϵ_1 , який має форму циліндра з радіусом R . Простір зовні циліндра заповнений безмежним однорідним діелектриком із провідністю ϵ_2 . Знайдіть напруженість поля \mathbf{E} , яке створює нитка, а також вектор поляризації \mathbf{P} .

64. Поверхня безмежно довгого круглого циліндра з радіусом R рівномірно заряджена з поверхневою густиною σ . Циліндр перебуває в неоднорідному діелектричному середовищі з проникністю $\varepsilon = \varepsilon(r)$, де r — відстань до осі циліндра. Знайдіть електричне поле \mathbf{E} і вектор поляризації \mathbf{P} .
65. Однорідна діелектрична куля радіуса a рівномірно заряджена по об'єму (густина заряду $\rho = \text{const}$), повний заряд кулі q , її діелектрична проникність ε_1 , діелектрична проникність середовища ε . Обчисліть вектори \mathbf{D} , \mathbf{E} , густини розподілу зв'язаних зарядів на поверхні (σ') і всередині (ρ') кулі.
66. Безмежну рівномірно заряджену площину з обидвох сторін оточує однорідний діелектрик з проникністю ε . Поверхнева густина вільних зарядів σ_0 . Знайдіть напруженість поля \mathbf{E} , яке створює площина.
67. Точковий заряд q розміщений на плоскій границі розділу двох однорідних безмежних діелектриків з проникностями $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. Знайдіть потенціал електричного поля φ та вектори \mathbf{D}, \mathbf{E} .
68. Плоский конденсатор заповнений діелектриком, проникність якого змінюється як $\varepsilon = \varepsilon_1(1 + x/a)$, де a — відстань між обкладками з площами S , а вісь x перпендикулярна до них. Нехтуючи крайовими ефектами, знайдіть ємність конденсатора та розподіл індукованих зарядів.
69. Провідна куля радіусом a оточена концентричним шаром діелектрика. Зовнішній радіус шару b , діелектрична проникність діелектрика ε . Розрахуйте ємність кулі C .
70. Центр провідної кулі радіуса R , яка містить заряд q , розміщений на плоскій границі розділу двох однорідних безмежних діелектриків з проникностями $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. Знайдіть потенціал електричного поля φ , а також розподіл зарядів на поверхні кулі.
71. Провідна заряджена куля радіуса a оточена безмежним діелектриком, проникність якого $\varepsilon = \varepsilon(r)$, де r — віддаль від центра кулі. Заряд кулі q . Знайдіть напруженість поля створеного кулею, а також поверхневу густину зв'язаних зарядів на межі кулі та діелектрика.
72. Провідна куля радіуса a оточена концентричним шаром діелектрика радіуса b . Знайдіть ємність такого конденсатора, якщо проникність діелектрика дорівнює ε .

73. Всередині сферичного конденсатора з радіусами обкладок a і b діелектрична проникність змінюється за законом

$$\varepsilon(r) = \begin{cases} \varepsilon_1 = \text{const} & \text{при } a \leq r < c, \\ \varepsilon_2 = \text{const} & \text{при } c \leq r < b, \end{cases}$$

де $a < c < b$.

Знайдіть ємність конденсатора, розподіл зв'язаних (індукованих) зарядів.

74. Знайти ємність сферичного конденсатора, заповненого наполовину однорідним діелектриком з проникністю ε_1 , а наполовину — однорідним діелектриком з проникністю ε_2 . Границя розділу між ними — площина, що проходить через центр обкладок. Радіуси обкладок a та b .
75. Знайти ємність циліндричного конденсатора. Його довжина l , радіуси обкладок R_1 та R_2 . Простір між обкладками конденсатора заповнений двома коаксіальними шарами однорідних діелектриків з проникностями ε_1 та ε_2 . Границя між діелектриками — циліндрична поверхня радіуса R_0 . Крайовими ефектами знехтувати.
76. Точковий заряд q знаходиться в центрі двох концентричних сфер з радіусами r_1 і r_2 . Проміжок між сферами заповнений діелектриком з проникністю ε . Обчисліть: напруженість електричного поля \mathbf{E} , вектор поляризації \mathbf{P} , величини зв'язаних зарядів q'_1, q'_2 на поверхнях сфер.
77. Знайдіть ємність плоского конденсатора. Площа поверхні обкладок S , а між ним два плоскопаралельних шари однорідних діелектриків. Товщина першого шару — d_1 , діелектрична проникність ε_1 , другого — відповідно d_2 і ε_2 . Крайовими ефектами знехтувати.

Зміст

1. Опис навчальної дисципліни	3
2. Мета та завдання навчальної дисципліни.....	4
3. Програма навчальної дисципліни.....	5
4. Структура навчальної дисципліни	9
5. Теми практичних занять	10
6. Самостійна робота.....	11
7. Методи контролю.....	12
8. Розподіл балів, що присвоюється студентам	12
9. Методичне забезпечення	13
10. Рекомендована література.....	13
11. Інформаційні ресурси	13
Приклад тесту для контролю якості знань студентів	14
Вибрані задачі для роботи на практичних, проведення контрольних робіт та іспиту.....	15