

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

І.П.Гаркуша

Лекційні демонстрації з фізики

Навчальний посібник

м. Дніпро

НТУ «Дніпровська політехніка»

2018

УДК 53(075.8)
Г53

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» як навчальний посібник для студентів всіх технічних спеціальностей (напрямів підготовки). (Протокол № 11 від 18 вересня 2018 г.).

Гаркуша І.П.

Лекційні демонстрації з фізики: навчальний посібник: - Д .: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2018. - 162 с.

Посібник містить каталог і опис лекційних демонстрацій фізичного кабінету НТУ «Дніпровська політехніка» по розділах механіка, молекулярна фізика, електродинаміка, коливання і хвилі, оптика і квантова теорія дисципліни «Фізика».

Описи лекційних демонстрацій включають назву, перелік приладів, їх зображення, методику проведення досліду, його теоретичне пояснення.

Навчальний посібник відображає 115-річний досвід роботи кабінету лекційних демонстрацій кафедри фізики НТУ «Дніпровська політехніка». Призначений для викладачів фізики вищих навчальних закладів з метою надання допомоги в забезпеченні курсу фізики лекційними дослідженнями. Може бути корисним також для студентів денної та дистанційної форм навчання.

Зміст

Передмова	9
Частина 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ	11
<i>Поступальний рух</i>	
1. 1. Векторний характер швидкості (дослід з точилом)	12
1. 2. Відцентрові сили інерції. «Ланцюжок, що бігає»	12
1. 3. Демонстрація принципу незалежності рухів	13
1. 4. 1-й закон Ньютона. Інерція. Вибивання картонки з-під кульки	14
1. 5. Закон збереження імпульсу.	14
1. 6. 3-й закон Ньютона. Важка гиря на дошці	15
1. 7. 3-й закон Ньютона. Два динамометри	15
1. 8. Зміна імпульсу. Інерція вантажу на нитці. Гиря з нитками зверху і знизу	16
1. 9. Інертність тіл. Ламання палиці в паперових кільцях	16
1. 10. Удар куль: центральний абсолютно пружний	17
1. 11. Удар куль: центральний абсолютно непружний	18
1. 12. Косий удар. Сталева кулька падає на сталеву плиту	18
1. 13. Скочування кульки по «мертвій петлі»	19
<i>Обертальний рух</i>	
1. 14. Модель сил і моментів при обертанні твердого тіла навколо нерухомої осі	20
1. 15. Маятник Обербека	20
1. 16. Скочування циліндрів з похилій площині	21
1. 17. Лава Жуковського. Студент з гантелями	21
1. 18. Лава Жуковського. Студент з колесом	22
1. 19. Великий гіроскоп. Прецесія	23
1. 20. Малі гіроскопи авіаційні. Прецесія	24
1. 21. Демонстраційний гіроскоп, що приводиться в обертання спеціальним приводом. Прецесія	25
1. 22. Паличка з прив'язаним на кінці нитки кулькою («маятник змінного радіуса»)	27
1. 23. Обертання тіл різної форми. Вільні осі обертання	28
1. 24. Обертання коробки навколо вільних осей	28
1. 25. Маятник Максвелла	29
Частина 2. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА	30
<i>Властивості газів</i>	
2.1. Дошка Гальтона. Встановлення статистичних закономірностей	31

2.2. Адіабатне розширення. Утворення туману.	32
2.3. Адіабатне стиснення. «Повітряне кресало»	32

Реальні гази

2.4. Перехід ефіру через критичний стан	33
2.5. Властивості рідкого азоту	35

Явища переносу

2.6. Дифузія в газах	35
2.7. Дифузія газів через пористу стінку	36
2.8. Внутрішнє тертя в газах	38

Властивості рідин

2.9. Поверхневий натяг. Поплавок Архімеда	39
2.10. Поверхневий натяг. Мильні плівки	39
2.11. Змочування і незмочування. Капіляри	40
2.12. Модель флотації	41
2.13. Властивості поверхневого шару рідини	42

Тверді тіла

2.14. Моделі кристалічних решіток	42
2.15. Модель пружної деформації твердого тіла	43

Частина 3. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ	44
--	----

Електростатика

3.1. Елементарні досліди з електростатики. Два роди електрики. Взаємодія заряджених тіл	45
3.2. Електрофорна машина	46
3.3. Силкові лінії електричного поля (султани паперові)	47
3.4. Провідники і діелектрики	47
3.5. Електризація через вплив (електростатична індукція)	48
3.6. Розподіл зарядів і потенціалу на поверхні і всередині зарядженого провідника.	49
3.7. Вимірювання потенціалу електричного поля в повітрі за допомогою полум'яного зонда	50
3.8. Реактивні сили, що виникають при стиканні зарядів з гострою. Колесо Франкліна..	52
3.9. Екранує, провідників. Клітка Фарадея	52
3.10. Розсувний конденсатор. Залежність напруги на конденсаторі від відстані між пластинами і діелектричної проникності діелектрика	53
3.11. Робота електричних сил	54

3.12. Поляризація діелектрика (невеликий стрижень з плексигласу)	55
3.13. Поляризація краю дерев'яної планки	55
3.14. Розбірна лейденська банка. Електрети	55
3.15. П'єзоефект (прямий)	57

Постійний електричний струм

3.16. Очищення газів. Електричний фільтр	58
3.17. Іонізація повітря і рекомбінація іонів	59
3.18. Котушка Румкорфа (високовольтний індуктор). Іскровий розряд в повітрі	59
3.19. Спостереження тліючого розряду з евакуацією повітря	61
3.20. Катодні трубки (трубки Крукса)	62
3.21. Вплив температури на опір металів і напівпровідників	61
3.22. Напівпровідники. Випрямляюча дія р-п переходу	65
3.23. Термопара. Демонстрація промислової термопари з доменної печі	67
3.24. Термопара зі шкалою температур	67
3.25. Явище Зеебека. Виникнення термоЕРС	67
3.26. Термоелектронна емісія. Робота електронної лампи-тріода	69

Магнітне поле

3.27. Інклінація і деклінація. Магнітна стрілка в магнітному полі Землі	70
3.28. Магнітні силові лінії постійних магнітів	70
3.29. Магнітне поле прямого струму. Дослід Ерстеда	70
3.30. Магнітне поле різних провідників зі струмом	71
3.31. Нерухома модель індукції магнітного поля на осі кругового струму	72
3.32. Дія магнітного поля на струм («гойдалки»)	72
3.33. Дія магнітного поля на струм. Верстат Ампера	73
3.34. Дія магнітного поля на струм. Обвивання провідника зі струмом навколо електромагніту	73
3.35. Рамка зі струмом в магнітному полі. Модель електродвигуна постійного то- ка	74
3.36. Взаємодія паралельних струмів	75
3.37. Котушка з струмом в неоднорідному магнітному полі	75
3.38. Взаємодія двох котушок зі струмом	76
3.39. Відхилення пучка електронів магнітом. Сила Лоренца	77

Електромагнітна індукція

3.40. Основні досліди М. Фарадея	77
3.41. Земний індуктор	79
3.42. Демонстрація правила Ленца при виникненні індукційного струму	79
3.43. Скидання кілець	80
3.44. Стрибуче кільце	81
3.45. Отримання змінного і постійного струму	82

3.46. Струми самоіндукції при замиканні і розмиканні кола.....	83
3.47. Явище самоіндукції. Екстраструми розмикання	84
3.48. Трансформатор	85
3.49. Захоплення провідника рухомим магнітним полем.	85
3.50. Вихрові струми в масивних провідниках (струми Фуко). Гальмування маятника, що коливається	86

Магнітне поле в речовині

3.51. Стрибокподібне намагнічування. Ефект Баркгаузена	87
3.52. Демонстрація постійного магніту ($B \sim 0,01$ Тл), до якого підносять залізний ключ	90
3.53. Петля гістерезису на електронному осцилографі	90
3.54. Точка Кюрі феромагнетика	92
3.55. Намагнічення залізного стрижня ударом в магнітному полі Землі	93
3.56. Властивості діа- і парамагнетиків	93

Частина 4. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

Механічні коливання і хвилі

4.1. Гармонійні коливання. Рух тіні від обертової кульки	96
4.2. Механічний запис коливань	97
4.3. Маятник пружинний	98
4.4. Фізичний маятник	98
4.5. Пов'язані маятники	98
4.6. Вимушені коливання. Резонанс на пружинному маятнику	99
4.7. Механічний резонанс. Резонатор Фрама	101
4.8. Автоколивання (коромисло)	101
4.9. Автоколивання. Забивання палі	102
4.10. Подвійний маятник (маятник Айрі). Додавання 2-х взаємно перпендикулярних коливань	102
4.11. Фігури Ліссажу на екрані осцилографа	103
4.12. Камертони. Додавання коливань. Биття	104
4.13. Утворення хвильового імпульсу на гумовому шлангу. Стоячі хвилі на гумовому шлангу.	105
4.14. Хвилі на поверхні води. Спостереження інтерференції хвиль від двох когерентних джерел	105
4.15. Модель біжить пружною хвилі - поздовжньої і поперечної. (Хвильова машина Е. Маха)	107
4.16. Межа чутності звуку.....	108
4.17. Аналіз звукових коливань за допомогою осцилографа	109
4.18. Явище Доплера в акустиці	110

4.19. Затухаючі коливання в коливальному контурі	111
4.20. Биття електричних сигналів на осцилографі	112
4.21. Релаксаційні коливання в схемі з неоновною лампою	112
4.22. Трансформатор Н. Тесли	114
4.23. Конденсатор в колі змінного струму. Струм зміщення	116
4.24. Стоячі електромагнітні хвилі в двохпровідній лінії (система Лехера).....	117
4.25. Властивості електромагнітних хвиль	119
4.26. Стоячі електромагнітні хвилі	122
4.27. Передача і прийом електромагнітних хвиль	123
Частина 5. ХВИЛЬОВА ОПТИКА	125
5.1. Інтерференція світла. Дослід Юнга	126
5.2. Інтерференція світла. Біпризма Френеля	126
5.3. Інтерференція світла в тонких плівках. Мильний клин	127
5.4. Інтерференція світла в тонких плівках. Застиглі тверді плівки	128
5.5. Інтерференція світла. Кільця Ньютона (Плоска і плоско-опукла скляні пластинки)	129
5.6. Інтерференція світла. Кільця Ньютона. (Скляна пластинка і плоско-опукла лінза)	130
5.7. Дифракція лазерного світла на дифракційних ґратах	131
5.8. Дифракція лазерного світла на круглому екрані. Пляма Пуассона	132
5.9. Дифракція на дифракційній ґратці в білому світі	133
5.10. Дослід з зонної платівкою	133
5.11. Поняття про спектральний аналіз. Демонстрація фотографії спектрів	134
5.12. Голограма.	134
(*) 5.13. Поляризація світла при відбитті від поверхні діелектрика	135
(*) 5.14. Подвійне променезаломлення в кристалах ісландського шпату	137
(*) 5.15. Модель призми Ніколя	138
(*) 5.16. Поляризація світла. Перевірка закону Малюса за допомогою двох ніколів... ..	138
5.17. Властивості поляризованого світла. Перевірка закону Малюса за допомогою двох поляроїдів.....	138
5.18. Інтерференція поляризованих променів	139
5.19. Штучна анізотропія. Досліди з пластинками і моделями, поміщеними між схрещеними поляроїдами	140
5.20. Дисперсія світла. Дисперсійні призми і призма прямого зору	141
5.21. Демонстрація світловода	142
Частина 6. КВАНТОВА ФІЗИКА	145
6.1. Теплове випромінювання. Демонстрація закону Кірхгофа	146
6.2. Модель абсолютно чорного тіла	147
6.3. Зовнішній фотоефект	147

6.4. Фотореле	149
6.5. Люмінесценція. Люмінофори - рідкі і порошкові. Післясвітіння.....	151
6.6. Дозиметричні прилади	151
Список рекомендованої літератури	156

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
кафедра фізики
<http://physics.ntu.org.ua>

Передмова.

З усіх навчальних дисциплін, які вивчаються в технічному ВНЗ, саме фізика в значній мірі закладає основи грамотності майбутнього фахівця, формує інтелект особистості.

Фізика є фундаментом, основою, як сучасної техніки, так і всього природознавства. Закони фізики спираються на досліди, тому очевидно, що викладання фізики повинно включати фізичні досліди. Лекційні досліди є необхідною частиною курсу загальної фізики і важливим дидактичним прийомом.

Як правило, всі основні явища, що становлять предмет фізичної лекції, можуть і повинні демонструватися на досліді. Лекційні демонстрації роблять будь-яке явище більш яким, допомагають його більш повному розумінню і запам'ятовуванню. На основі спостережень і роздумів у студентів формується власна точка зору на ті, чи інші явища природи.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» - один з найстаріших (1899) вузів України. Ще на початку своєї історії університет (тоді Вище гірниче училище) готував гірничих інженерів, які в числі інших наук вивчали фізику 5 семестрів і були високоосвіченими і різнобічно грамотними фахівцями, відомими в своїх регіонах. Лекції з курсу фізики супроводжувалися демонстраційними дослідами з використанням новітнього на той час обладнання. Демонстраційне обладнання ввозилося з-за кордону.

Працями багатьох поколінь викладачів і лаборантів кафедри фізики НТУ «Дніпровська політехніка» був створений унікальний кабінет лекційних демонстрацій, який і до теперішнього часу є в числі кращих серед технічних вузів України.

Кафедра має фізичну аудиторію амфітеатром на 100 місць. Це оснащено рядом специфічних технічних пристроїв приміщення, придатне для читання курсу фізики з застосуванням лекційних демонстрацій.

До нього примикає кабінет фізичних демонстрацій, який представляє собою лабораторію, де зберігається устаткування лекційного забезпечення і готуються демонстрації.

В останні роки в навчальних планах вузів на фізику відводиться два, а часто і один семестр. За цей час студент повинен отримати знання з усіх розділів загальної фізики, починаючи від фізичних основ механіки і закінчуючи ядерною фізикою.

Зрозуміло, що в таких умовах методика викладання фізики має бути максимально ефективною, а лекційні досліди повинні бути ретельно відібрані, глибоко продумані і кваліфіковано здійснені.

Лекційна аудиторія в усіх вузах, як правило, сильно завантажена. Природно, що лекційні досліди не завжди можуть бути протягом перерви між лекціями підготовлені і налагоджені на демонстраційному столі фізичної аудиторії.

В результаті багаторічного досліду кафедри фізики склалася така технологія підготовки демонстрації. Була створена картотека лекційних демонстрацій, в якій систематизовано за розділами курсу фізики всі наявні демонстраційні досліди.

На кожній картці наводиться назва досліду, його короткий зміст, малюнок і вказівки для демонстратора. Лектор під час підготовки до лекції відбирає потрібні йому демонстрації, і демонстратор вписує їх в журнал замовлень демонстрацій. Демонстратор заздалегідь знайомиться з замовленнями і готує лекційні досліди.

Даний навчальний посібник з коротким описом лекційних демонстрацій може грати роль картотеки для лектора, особливо початківця. Як правило, опис кожного демонстраційного досліду супроводжується рисунком. У багатьох випадках наводиться пояснення досліду. Якщо ж теорія досліду достатньо повно викладена в підручниках, дається посилання на літературу.

За більш ніж столітню історію існування кафедри фізики НТУ «Дніпровська політехніка» мала в своєму демонстраційному кабінеті та здійснювала показ майже усіх відомих на той час у вищій школі лекційних демонстраційних дослідів. Крім того, працями науковців та лаборантів кафедри було розроблено та застосовано цілий ряд унікальних лекційних дослідів. Таких, наприклад, як зонні пластинки для ультразвуку, поляризаційні призми Ніколя, ісландського шпату, епідіаскоп фірми Карл Цейсс, електромагніт з магнітною індукцією близько 0, 1 Тл, ванна Гюйгенса, хвильова машина Е. Маха і інших.

На жаль, демонстраційне обладнання застаріває фізично і морально, прилади виходять з ладу, бо вичерпують час свого існування. Сьогодні багато вузів України мають проблеми з лекційними фізичними демонстраціями.

Одне з найбільш істотних утруднень полягає в тому, що обмеженість фінансування не дозволяє багатьом вузам оснастити кафедри фізики сучасним демонстраційним обладнанням, а обсяг випуску, наприклад, підприємством «Учбова техніка» (м. Рівне) демонстраційного обладнання охоплює тільки невелике коло фізичних явищ.

У той же час швидкий розвиток отримує мультимедійна проекція і комп'ютерне моделювання і, фактично, поступово парк старіючого демонстраційного обладнання замінюється комп'ютерними засобами. Однак це, на нашу думку, не замінить живого лекційного досліду.

За словами великого фізика Дж. К. Максвелла «чим простіше матеріали ілюстративного досліду і чим більше вони звичні учням, тим глибше вони зрозуміють ідею, яку повинен ілюструвати цей дослід. Виховна цінність таких дослідів часто обернено пропорційна складності приладів».

Все викладене підкреслює необхідність збереження накопиченого в НТУ «Дніпровська політехніка» досліду, яку переслідує дане видання.

Зауважимо, що деякі досліди, відмічені в даному посібнику зірочкою, представляють лише історичний інтерес, подібно до того, як лампова радіотехніка практично зникла з користування.

Частина 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ

1.1. Векторний характер швидкості (дослід з точилом)

Прилади. На валу електродвигуна укріплений дерев'яний шків. До його бічної поверхні приклеєний грубий наждачний папір. Напилком.

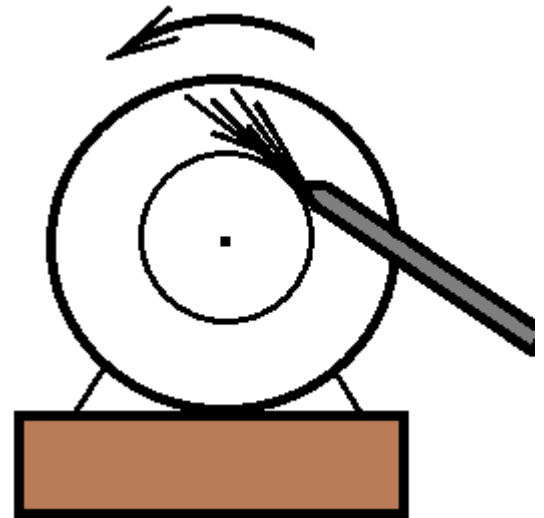
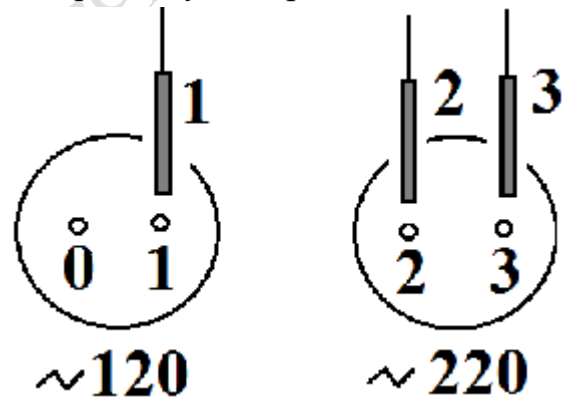
Дослід. Приводять у швидке обертання електродвигун і торкаються до бічної наждачної поверхні шківа напилком (або будь-яким стрижнем із загартованої сталі). Пучок іскор вилітає в місці торкання напилка по дотичній до окружності.

Пояснення досліду. Швидкість матеріальної точки спрямована по дотичній до траєкторії. Роль матеріальних точок виконують розпечені частинки металу.

Вказівки для демонстратора. Включення електродвигуна здійснюється трьома пронумерованими штекерами в три пронумерованих гнізда на демонстраційному столі. Якщо номери штекерів відповідають номерам розеток, вал буде крутитися проти годинникової стрілки, якщо дивитися з аудиторії. Змінюючи номери з'єднань (наприклад, міняючи місцями дві фази), можна змусити мотор крутитися в іншу сторону.

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ. Дослід вимагає великої обережності. Дослід обов'язково показують удвох. Одна людина (наприклад, демонстратор) притискає до великого столу підставу електродвигуна (якщо його не притискати, величезна швидкість обертання ротора може привести до повороту статора в протилежну сторону і падіння електродвигуна зі столу). Друга людина (наприклад, лектор) торкається до наждаку, що обертається, в декількох місцях по черзі напилком, не загорожуючи спиною картину від аудиторії.

Притискати напилком треба **УСЛІД НАПРЯМКУ !!!** обертання. Якщо притиснути його **назустріч обертанню, напилком вирве з рук**, і наслідки будуть дуже сумними. Якщо цю процедуру буде виконувати в якості другого демонстратора лектор, то треба перед лекцією показати йому, як правильно слід тримати напилком.

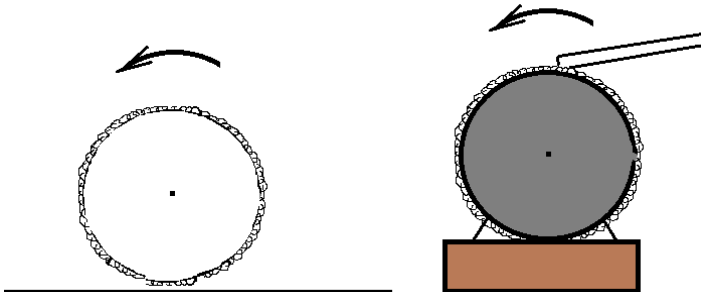


1.2. Відцентрові сили інерції. Ланцюжок, що «бігає»

Прилади. На дерев'яний шків електродвигуна, описаного в попередньому досліді, щільно одягається металевий ланцюжок. Ланки цього ланцюжка є невеликого розміру (≈ 8 мм) і дозволяють йому прийняти форму кола. Якщо ланцюжок викласти по колу, діаметр отриманого кільця буде дорівнює приблизно 25-30 см. Мотор ставлять на край демонстраційного столу, ближній до вхідних дверей. Включають, дотримуючись правил досліду 1.1.

Дослід. Коли шків на валу електромотора стійко розкрутиться, ланцюжок дерев'яною дощечкою зсувають зі шківів. Ланцюжок котиться по столу як пружне кільце і пробігає весь демонстраційний стіл. В кінці столу лектор може зловити ланцюжок указкою, якщо добре потренується. В іншому випадку ланцюжок просто зіскочить зі столу і з гуркотом впаде на підлогу.

Пояснення досліду. У лабораторній (інерційній) системі відліку на ланки ланцюжка діють сили, спрямовані до центру, що надає частинкам ланцюжка нормальне прискорення. Вона є пружною силою, що виникає в результаті розтягування ланок ланцюжка.



Спостерігач, що знаходиться в системі відліку, яка обертається і є неінерційною, робить висновок,

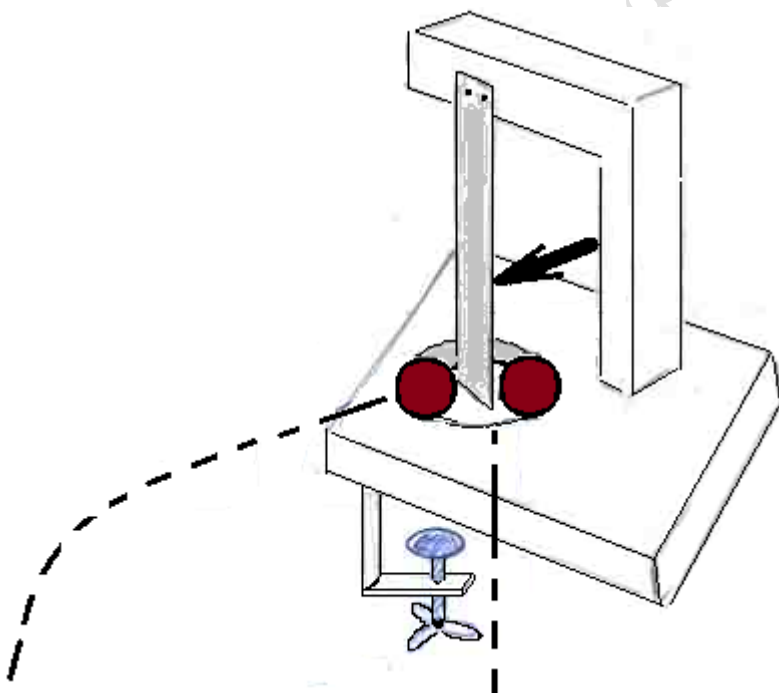
що на ланки ланцюжка діє сила $F = m\omega^2 R$, спрямована вздовж радіуса від центру, яка врівноважується пружною силою натягу ланок. Її називають відцентровою силою інерції.

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ. Дослід вимагає великої обережності. Дослід показують удвох (див. вказівки до досліду з іскрами). Дощечку, як і напилек в першому досліді, ставлять ПО ХОДУ колеса, а не проти ходу. Ланцюжок ні в якому разі не повинен потрапити в людину, для цього другий демонстратор (лектор, наприклад) не повинен стояти в площині обертання ланцюжка, а тільки збоку.

1.3. Демонстрація принципу незалежності рухів

Прилади. Прилад з отвором і сталеву пластинчасту пружину. Прилад кріпиться до малого демонстраційного столу струбциною. Дві дерев'яних кульки однакового діаметра і маси. Пружина утримує кульки від падіння в отвір приладу.

Дослід. Ударом дерев'яного молоточка по низу пружини перпендикулярно до її площині (див. рис.) одній кульці надається горизонтальна швидкість і вона буде падати за параболою. Інша кулька, звільнившись від пружини, падає вертикально вниз. Обидві кульки падають з однієї висоти. За стуком кульок об підлогу роблять висновок про те, що вони досягли підлоги одночасно.



Пояснення досліду. Демонструється принцип незалежності рухів.

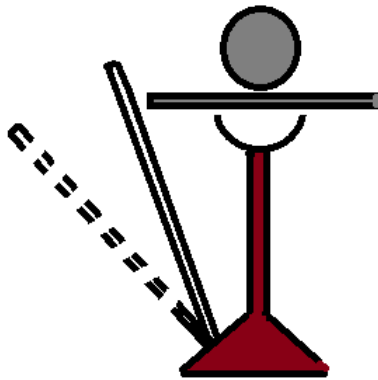
Принцип встановлений експериментально: якщо тіло бере участь одночасно в декількох рухах, то кожний з них відбувається незалежно від інших.

Кулька, що отримала в початковий момент часу горизонтальний імпульс, здійснює складний рух. Вона рухається горизонтально з постійною швидкістю (якщо опором повітря нехтують) і одночасно вільно падає. Обидва рухи є незалежними один від одного.

Вертикальна складова швидкості кульки змінюється незалежно від того, який був отриманий початковий горизонтальний імпульс. Тому час падіння обох кульок до підлоги буде одним і тим же. Ми почуємо один удар, а не два удари.

1.4. 1-й закон Ньютона. Інерція. Вибивання картонки з-під кульки

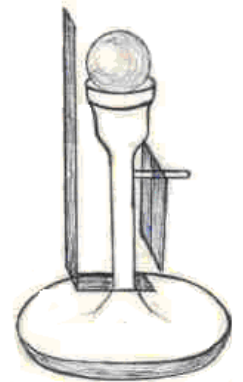
Прилади. На картонку, покладену на стійку з поглибленням, кладуть металеву кульку. Це роблять ретельно, дивлячись збоку, так, щоб кулька розмістилась якраз над поглибленням.



Дослід. Якщо потягнути повільно картонку рукою, кулька рухається разом з картонкою. При різкому ударі пружинкою по картонці вона вилітає, а кулька залишиться і падає в поглиблення.

Пояснення дослід. При повільному витягуванні картонки з-під кульки вона рухається за картонкою за рахунок сили тертя. При цьому час дії сили є великим і зміна імпульсу кульки $\Delta p = F_{\text{тер}} \Delta t$ є значною, вона рухається за картонкою.

Якщо сила діє на тіло, що покоїться, протягом малого проміжку часу Δt , то зміна імпульсу Δp є малою, і тіло великої маси залишається в спокої.



1.5. Закон збереження імпульсу

Прилади. На штативі на нитках підвішені кульки. Між двома дерев'яними кульками затиснута сталева пружина. Кульки зв'язані між собою ниткою, простягнутою в отвори кульок, просвердлені вздовж діаметра.

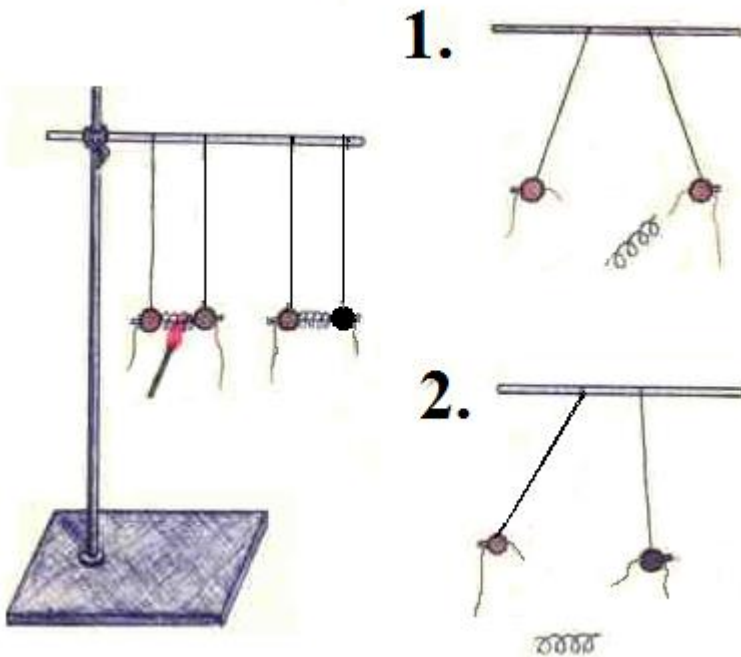


Дослід. 1. Нитка перепалюється, і пружина розштовхує кульки, які відскакують на рівні кути від вертикалі, а пружина падає вниз.

2. Якщо виконати той же дослід, але замість однієї з дерев'яних кульок взяти свинцеву такого ж діаметру, то після перепалювання нитки свинцева кулька відхиляється трохи, а дерев'яна - відлітає на велику відстань.

Пояснення дослід. Пружина діє з однаковою силою на обидві кульки. Коли нитку, що стискує пружину, перепалюють, кожна з них отримує однаковий за

модулем імпульс, тому що векторна сума імпульсів кульок повинна бути такою ж, як і до перепалювання, тобто рівною нулю. З другого закону Ньютона випливає, що в разі однакових мас кульок їх прискорення однакові. Якщо маси кульок є різними, прискорення обернено пропорційні їх масам.

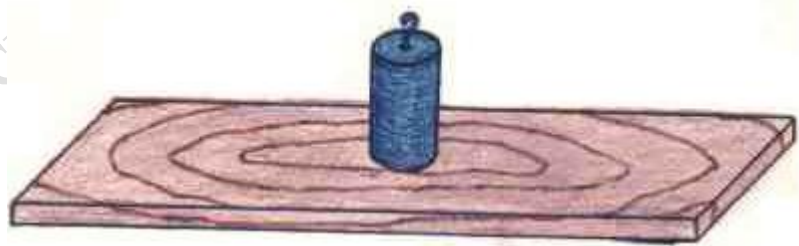


Примітка для демонстратора. Пружину дуже сильно не стискати.

1.6. 3-й закон Ньютона. Важка гиря на дошці

Прилади. Дошка, гиря.

Дослід. Студент тримає на рівні грудях на долонях витягнутих рук гирю на дошці. Демонстратор, почекавши трохи, несподівано для студента знімає гирю. При цьому руки студента мимоволі роблять ривок вгору.



Пояснення досліду. За 3-м законом Ньютона гиря діє на долоні з силою, спрямованою вниз і прикладеною до долонь. Долоні, в свою чергу, діють на гирю (з дошкою) з такою ж за модулем силою, спрямованою вгору і прикладеною до дошки.

Примітка. Долоні повинні бути звернені внутрішньою стороною вгору. Великими пальцями рук дошку не затискати.

1.7. 3-й закон Ньютона. Два динамометри

Прилади: два динамометри, штатив.

Дослід. Прикріпити динамометри до штативу. Зчепити їх гачками. Верхній динамометр показує вагу нижнього, а нижній - свою вагу, тобто показання динамометрів є однаковими.



1.8. Зміна імпульсу. Інерція вантажу на нитці. Гиря з нитками зверху і знизу

Прилади: штатив універсальний, масивний вантаж (гиря) з двома гачками - зверху і знизу, паличка, нитки.

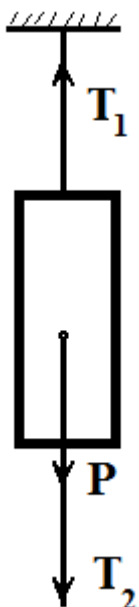
Дослід. Важкий тягар підвішують на нитці за верхній гачок. Внизу до вантажу потрібно підвісити таку ж петлю, яка вільно звисає.

Якщо намотати кінець цієї нитки на паличку і різко смикнути вниз - вона обірветься, а вантаж залишиться висіти на верхній нитці.

Якщо повільно тягнути нижню нитку, то обірветься верхня нитка і вантаж упаде.

Прикладом з життя може служити обрив гнучкого троса за спроби ривком зрушити з місця буксирований транспорт.

Вказівка: щоб вантаж при падінні не травмував руку, намотувати нитку на паличку слід ближче до краю палички.



Пояснення досліду. Коли нижню нитку різко смикають, час взаємодії руки і нитки є малим і вантаж не встигає змінити свій імпульс, зберігає стан спокою.

Коли натяг нитки збільшується поступово, дія триває більше часу і вантаж набуває швидкості. З рисунка видно, що $T_1 = T_2 + P$. Звідси $T_1 > T_2$. Під час повільного натягу нижньої нитки в певний момент часу T_1 досягає граничної величини T_{\max} . У цей момент часу T_2 все ще є меншим за T_{\max} . Тому нижня нитка не обривається.

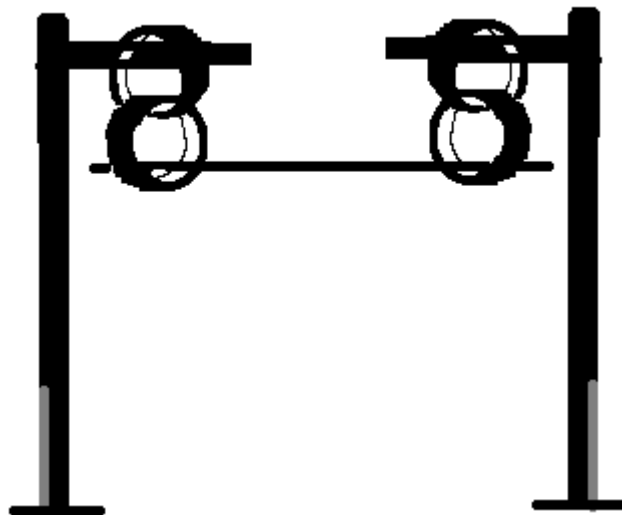
1.9. Інертність тіл. Ламання палиці в паперових кільцях

Прилади: штативи, чотири паперових кільця, дерев'яна рейка, металевий прут (шматок арматури завдовжки 70 см, діаметром 1 см).

Дослід. Повільно натискають досить важким металевим прутом на середину рейки. Це призводить до розриву одного з кілець. Після цього, вставивши нові кільця, щосили з розмаху б'ють посередині рейки. Тепер рейка ламається, а кільця залишаються цілими.

Демонструється інертність тел.

Вказівка. Паперові кільця шириною 3 см вирізають з ватманського паперу і склеюють.



1. 10. Удар куль: центральний абсолютно пружний

Прилади. На спеціальній стійці біфілярно підвішені кілька більярдних куль.

Дослід. Кулі однакової маси. Спочатку залишають тільки дві кулі. Інші акуратно піднімають на верхню частину стійки. Туди ж відправляють і дві пластилинових кулі.

Відхиливши одну з куль, відпускають її. Вдарившись об другу кулю, перша куля зупиняється, а друга відхиляється майже на таку ж відстань - відбувається обмін швидкостями. У цьому місці досліду демонстратор ловить рукою кулю, що відхилилася і пояснює фізику процесу. Потім відпускає другу кулю, вона вдаряється об першу і залишається на місці. Так вони по черзі зупиняються і відскакують. Після двох - трьох ударів кулі треба зупинити, тому що в результаті не цілком центрального удару кулі починають розгойдуватися.

Якщо відвести обидві кулі в сторони на різні відстані і відпустити, відбувається обмін швидкостями.

Потім беруть три кулі однакової маси. Відхиляють крайню кулю. Після удару відскакує куля, що висить з протилежного кінця ланцюжка куль, а всі інші залишаються на місці (виконується закон збереження імпульсу). Якщо відхилити дві кулі, то після удару відскакують теж дві кулі.

Нарешті, відхиляють чотири з п'яти куль. На місці залишається одна.

Після цього беруть *дві кулі різної маси*. Під час удару малої кулі по великій мала куля відскакує назад з меншою швидкістю, а велика куля відхиляється незначно. Під час удару великої кулі по малій кулі рухаються в одному напрямку, але з різними швидкостями.

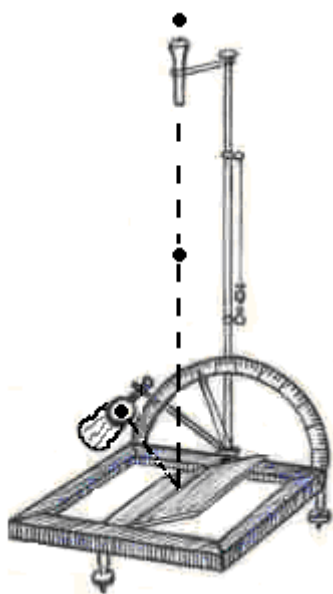
Вказівка. Перед дослідом необхідно ретельно вирівняти лінію центрів куль і залишити між кулями дуже малі зазори, підкручуючи або відпускаючи їх біфілярні підвіси. Зазвичай прилад виносять в аудиторію заздалегідь, установку центрують на демонстраційному столі і більше до показу не пересувають.

1.11. Удар куль: центральний абсолютно непружний

Прилади. На тій самій стійці, на якій висять більярдні кулі (дослід 1.10), підвішені на біфілярних підвісах дві пластилінових кулі діаметром 4-5 см. У положенні рівноваги кулі злегка торкаються одна одної.

Дослід. Відводять одну кулю в сторону і відпускають. Під час удару кулі злипаються і рухаються разом.

Вказівка. Якщо дослід давно не показували, пластилін може підсохнути, і кулі покриються твердою скоринкою. Корисно перед дослідом злегка нагріти кулі струменем теплого повітря для більшої їх пластичності.



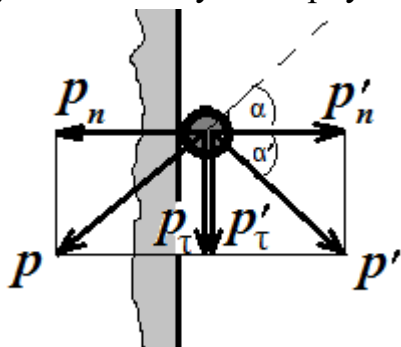
1. 12. Косий удар. Сталева кулька падає на сталеву плиту

Прилади. Спеціальний прилад оснащений шкалою кутів, вираженою в градусах. Плита, на яку вертикально через направляючу трубку падає кулька, може повертатися і фіксуватися гвинтом. Перпендикуляром до плити служить поєднана з плитою стрілка-показчик. Кут між перпендикуляром до плити (стрілкою) і вертикаллю за визначенням є кут падіння. Якщо вважати удар абсолют-

но пружним, справедливий закон: «кут падіння дорівнює куту відбивання». Цей закон і перевіряють на досліді.

Дослід. Встановлюють мішечок, в який ловлять кульки, за шкалою приладу на **подвійний кут в порівнянні з кутом падіння**, що відлічується за шкалою.

(Наприклад, кут, який утворює стрілка з вертикаллю, дорівнює 30° . Відлік кута йде від нуля зверху. Тоді держатель мішечка треба встановити на кут 60° , і закріпити все гвинти).



Встановлюють кути і ловлять одну кульку точно в мішечок. Опускають потім поспіль кілька кульок - і всі падають в мішечок!

Вказівка. Прилад встановлюють строго по відвісу для вивірки вертикального положення.

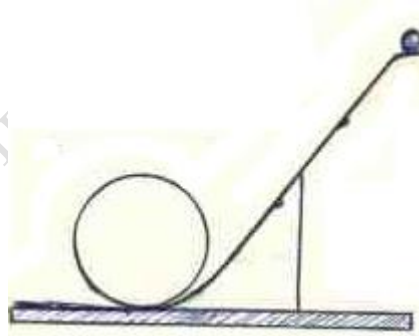
Пояснення досліду. У разі, коли сили тертя, що виникають при ковзанні поверхні кулі по пластині, дуже малі в порівнянні з пружними силами, можна знехтувати дією сил тертя. За відсутності сил тертя дотична до пластини складова імпульсу кулі p_τ до і після удару не змінюється. Нормальна ж складова імпульсу

тільки змінює знак, а за величиною не змінюється (тому що удар вважається абсолютно пружним). В результаті стає справедливим закон відбивання $\alpha = \alpha'$.

1.13. Скочування кульки за «мертвою петлею»

Прилади: жолоб з петлею, кулька.

Дослід. Беруть кульку і скачують її по жолобу з різної висоти. Якщо пускати з висоти, меншою $2R$, кулька не проходить коло. Якщо пускати з висоти рівно $2R$, кулька теж зривається з петлі, тому що кулька нагрівається, але працюють сили тертя. Потім пускати з висоти, рівної $2,5R$. При цьому кулька рухається по колу без відриву у верхній точці петлі. "Мертва петля" застосовується для демонстрації переходу потенціальної енергії кочення (суперпозицію поступального і обертального руху).



проходить коло. кулька теж зривається з петлі, тому що кулька нагрівається, але працюють сили тертя. Потім пускати з висоти, рівної $2,5R$. При цьому кулька рухається по колу без відриву у верхній точці петлі. "Мертва петля" застосовується для демонстрації переходу потенціальної енергії кочення (суперпозицію поступального і обертального руху).

Пояснення досліду. Щоб знайти мінімальну висоту H , з якої має скочуватися кулька, щоб вона не зірвалася у верхній точці петлі, скористаємося законом збереження енергії.

Потенціальна енергія кульки на висоті H має дорівнювати сумі кінетичної і потенціальної енергій у верхній точці петлі (на висоті $2R$):

$$mgH = \frac{mv^2}{2} + mg2R. \quad (1)$$

Щоб визначити швидкість у верхній точці петлі, застосуємо другий закон Ньютона. На кульку в верхній точці мертвої петлі діють сила тяжіння mg і сила реакції петлі F_R . Їх сума надає кульці нормальне прискорення:

$$mg + F_R = m \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

У момент відриву $F_R = 0$, тоді $v^2 = gR$. остаточно маємо

$$H \geq 2R + \frac{v^2}{2g} = 2R + \frac{R}{2} = \frac{5}{2}R. \quad (3)$$

Для ілюстрації можна розповісти про "мертву петлю" льотчиків.

1.14. Модель сил і моментів під час обертання твердого тіла навколо нерухомої осі



Показані вектор сили, що діє на i -у частинку, його складові по осях і момент імпульсу i -ї частинки.

1.15. Маятник Обербека

Мета дослід. Перевірка рівняння обертального руху абсолютно твердого тіла відносно нерухомої осі $M = I \varepsilon$.

Прилади: маятник Обербека, вантажі, секундомір.

Дослід. Маятник має два шківів різного радіусу. Маятник розкручується одним або декількома вантажами. Змінюючи кількість вантажів і радіус (плече) шківів, на якому намотаний шнур, переконуємося, що кутове прискорення ε пропорційно моменту сили M .

Кутове прискорення обернено пропорційне квадрату часу, за який вантажі пройдуть від краю демонстраційного столу до підлоги. Час можна вимірювати демонстраційним секундоміром.

Маса обертається хрестовини з вантажами, що обертається, є однією й тією ж. Але вона по-різному розподілена в двох дослідів. Чим далі від осі обертання зосереджена маса тіла, тим важче розкрутити хрестовину під дією постійної сили, що має одне і те ж плече - радіус шківів, на який намотана нитка.

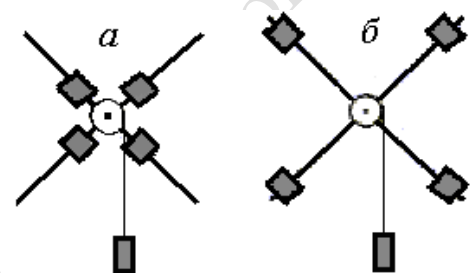


Рис. 29.2.

Змінюючи відстань вантажів на стрижнях маятника від центра при одному і тому ж моменті сил, переконуємося в тому, що кутове прискорення тим менше, ніж більшим є момент інерції.

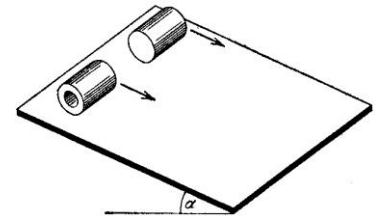
1.16. Скочування циліндрів з похилій площини

Прилади: два циліндри - пустотілий металевий і суцільний дерев'яний - однакової маси і одного радіуса. Похила площина. Лінійка.

Дослід. Беруть два циліндри, прикладають їх один до одного підставами і показують, що зовнішні радіуси у них однакові. Лінійкою нагорі похилої площини утримують від руху обидва циліндри.

Питають аудиторію: який раніше скотиться, якщо прибрати лінійку? (У 90% випадків відповідь - залізний ...). Раптово прибирають лінійку. Дерев'яний обганяє.

Пояснення досліду. Моменти сил, що обертають (момент сили тяжіння відносно миттєвої осі, що проходить через точку дотику) в обох випадках однакові оскільки в обох циліндрів однакові маси і радіуси. Але моменти інерції різні - дерев'яний має менший момент інерції ($\frac{mr^2}{2}$), ніж металевий (mr^2). З основного рівняння динаміки обертального руху твердого тіла $M = I\varepsilon$ слід: $I_{д}\varepsilon_{д} = I_{м}\varepsilon_{м}$. Кутові прискорення, тому, теж є різними: $\varepsilon_{д} > \varepsilon_{м}$ (дерев'яний обганяє металевий).

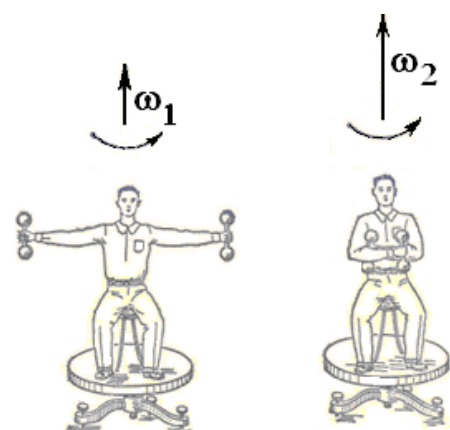


1.17. Лава Жуковського. Студент з гантелями

Прилади. Лава Жуковського - платформа в формі крісла, яке може вільно обертатися навколо вертикальної осі на підшипниках, гантелі.

Дослід. 1. Студент сідає на лаву. Лава не обертається. Тримаючи на витягнутих вперед руках гантелі, студент різко повертає руки з гантелями вліво (вправо), лава при цьому повертається в іншу сторону - вправо (вліво).

2. Студент тримає руки з гантелями, розведеними в сторони. Демонстратор надає студенту повільного обертання. За командою демонстратора студент швидко притискає гантелі до грудей, лікті опускає, як кажуть спортсмени, «групується». Внаслідок зменшення моменту інерції системи кутова швидкість обертання різко збільшується.



За наступної команди студент знову розставляє руки. Швидкість обертання зменшується. Можна повторити дослід знову.

Пояснення досліду. Моменти всіх зовнішніх сил можна вважати рівними нулю. Момент сили тяжіння людини дорівнює нулю, тому що центр її ваги розміщується на осі обертання. Силами тертя в підшипниках і силами опору повітря внаслідок їх

малості можна знехтувати. Тому *обертальний імпульс (момент імпульсу) системи $I\omega$ повинен залишатися сталим*. Якби внутрішні рухи не здійснювалися, внутрішні сили не можуть змінити обертального імпульсу системи.

Вказівка. Необхідно стежити за тим, щоб гантелі при розкручуванні з розведеними руками не зачіпали за стінку і не травмували демонстратора.

1.18. Лава Жуковського. Студент з колесом

Прилади. Лава Жуковського, велосипедне колесо.

Дослід. Для демонстрації векторного характеру закону збереження обертального імпульсу в руки студента на нерухомій лаві Жуковського передається велосипедне колесо, яке обтяжене по обідку для збільшення його моменту інерції. Колесо тримають двома руками так, щоб вісь його обертання була спрямована вертикально. Наприклад, лівою рукою тримають ручку 1, правою - ручку 2 так, щоб вона була зверху колеса (див. рис. колеса).

Демонстратор сильним ривком розкручує колесо. Тим самим системі надається деякий обертальний імпульс L (спрямований, наприклад, як на рисунку, вертикально вгору). Весь обертальний імпульс зосереджений в колесі.

За командою демонстратора студент перевертає колесо на 180° . Для цього, залишаючи на місці ручку 1, повертає ручку 2 так, щоб вона опинилася знизу колеса.

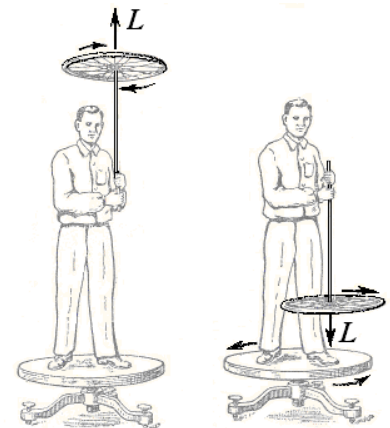
Тепер напрямок обертання колеса відносно лави зміниться на протилежний, і обертальний імпульс колеса буде тепер спрямований вниз. Тоді студент з лавою починає обертатися в протилежну обертання колеса сторону так, щоб сума векторів обертального імпульсу студента з лавою і обертального імпульсу колеса давала попередній вектор обертального імпульсу.

Ще один варіант досліду. Лава зі студентом нерухома. Студент упирає в пряжку пояса на животі ручку 1 колеса, і тримає лівою рукою колесо за ручку 2. Демонстратор розкручує колесо різким рухом і просить студента правою вільною рукою схопитися за обід колеса, що обертається, і таким чином зупинити його. (Перед цим спочатку на нерухомому колесі, а потім на такому, що повільно обертається, студент тренується в зупинці колеса так, щоб хапатися за обід, а не за спиці). Після зупинки колеса лава починає обертатися в ту ж сторону.

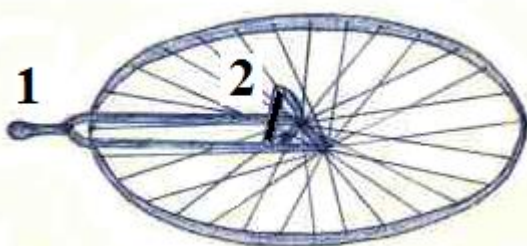
Пояснення досліду див. в досліді

1.17.

Вказівка. Перед проведенням досліду з ревертом колеса необхідно потренувати студента перевертати нерухоме колесо.



пе-
ден-



1. 19. Великий гіроскоп. Прецесія

Прилад. Демонстраційний гіроскоп з горизонтальною віссю обертання, який розкручується електромотором. Опора осі гіроскопа дозволяє йому обертатися навколо вертикальної і горизонтальної осей, що проходять через точку опори.

Дослід. Властивість врівноваженого гіроскопа полягає в тому, що його вісь прагне стійко зберігати в просторі приданий їй початковий напрям.

Спочатку на нерозкрученому гіроскопі показують, як прилад може вільно обертатися навколо горизонтальної та вертикальної осей - вісь нерухомого гіроскопа похитують рукою вгору-вниз і вправо-вліво.

Потім включають мотор. Плавню гіроскоп набирає обертів. Число обертів лектор зчитує вголос зі шкали приладу. Розкручуючи гіроскоп, демонстратор притримує рукою планку з противагою в якомусь одному напрямку (наприклад, направляючи на сидячого в аудиторії обраного студента). Коли гіроскоп набере обертів, дуже легко торкаються указкою до планки з противагою. Вона застигла нерухомо.

(Лектор коментує: «Це принцип автопілоту - зберігати заданий напрямок»).

Пояснення досліду. Властивість гіроскопа проявляється, коли на його вісь починає діяти сила, яка прагне привести вісь в рух.

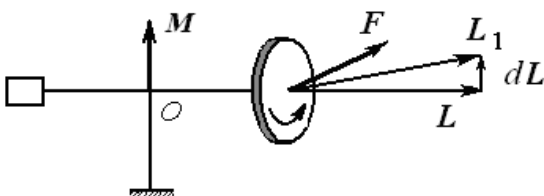


Рис. 1.

площині.



Подіємо на вісь деякою горизонтальною силою F (рис. 1) (можна злегка подіяти кінцем указки горизонтально на противагу). Здавалося б, вісь гіроскопа мала б повернутися вправо. Так було б, якби гіроскоп не обертався. Якщо ж він обертається, то поверне свою праву частину в перпендикулярному до лінії дії сили напрямку - вгору у вертикальній

Така поведінка гіроскопа називається *гіроскопічним ефектом*. Рух кінця осі гіроскопа відбувається не в напрямку сили F , а в напрямку моменту сили M .

Якщо тепер подіяти на вісь гіроскопа силою F в вертикальному напрямку (рис. 2, простіше натиснути злегка вертикально вниз на протियाгу), то його вісь буде повертатися в горизонтальній площині.

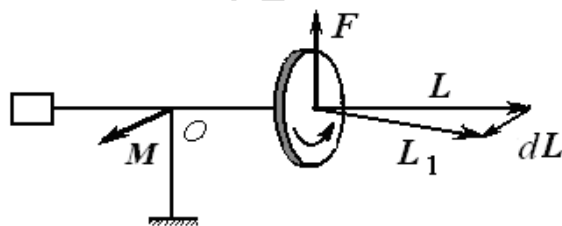


Рис. 2.

Обертання осі гіроскопа під дією сили називається *прецесією*. Пересуваючи тягар-протियाгу ближче або далі від точки опори (ця дія є рівносильною прикладанню постійно діючої на вісь гіроскопа вертикально вниз (вгору) сили), спостерігаємо прецесію осі то в одну, то в іншу сторону.

Вказівки. Порядок включення і виключення стаціонарного гіроскопа.

1. Перевірити, чи включений «Регулятор швидкості».
2. Встановити вісь обертання гіроскопа в горизонтальному положенні і врівноважити планку тягарцем.
3. Включити в розетку 220 В на демонстраційному столі.
4. Натиснути червону кнопку «Мережа».
5. Збільшувати швидкість обертання гіроскопа «Регулятором швидкості» до 6000 об / хв.
6. Повільно зменшувати швидкість обертання «Регулятором швидкості» до повної зупинки.
7. Вимкнути «Регулятор швидкості». Натиснути червону кнопку «Мережа». Вимкнути з розетки.

1.20. Малі гіроскопи авіаційні. Прецесія

Прилади. 1). Перетворювач напруги ПАГ-1Ф. Призначений для перетворення постійної напруги 24 - 28 В в перемінну напругу 3 x 36 В x 400 Гц. для живлення авіагоризонтів. Конструктивно складається з двох вузлів: електродвигуна постійного струму і генератора змінного струму, з'єднаних загальним валом. Застосовується на літаках і вертольотах. 2). Авіаційні гіроскопи - 3 шт. Перемикач. З'єднувальні дроти.

У демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 виставляється напруга в розетку на столі 27 В (3 А).

Дослід.

Поеднуючи роз'єм, що йде від ПАГ-1Ф, з малим гіроскопом, розкручують гіроскопи по



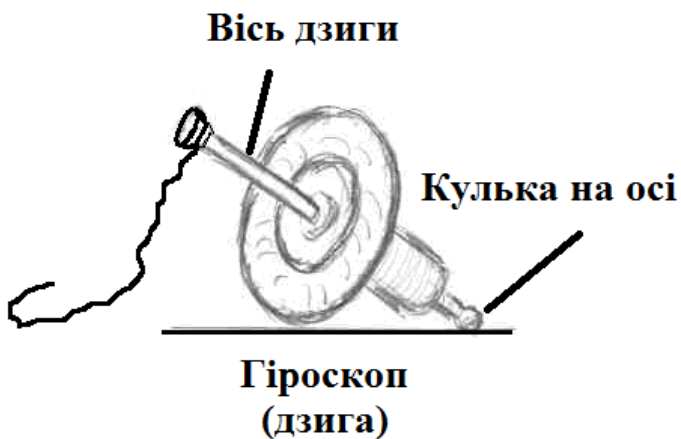
черзі. 2 розкручених гіроскопа передають рядами студентів. Пропонують слухачам взяти гіроскоп в долоню і, обертаючи долонею в різних напрямках, відчутти прагнення гіроскопа зберегти напрямок осі обертання («гіроскопічний ефект»).

На третій розкручений гіроскоп нагвинчують подовжувач осі, ставлять його цим подовжувачем на демонстраційний столик і спостерігають прецесію осі (див. фото).

Вказівка. Слід оберегати гіроскопи від ударів і падінь.



1.21. Демонстраційний гіроскоп, що приводиться в обертання спеціальним приводом. Прецесія



Прилади. гіроскоп-дзига, гіроскоп в кардановому підвісі з горизонтальною віссю обертання, привід для розкручування гіроскопів, відрізок допоміжної нитки.

Дослід. Спочатку розкручують гіроскоп-дзигу.

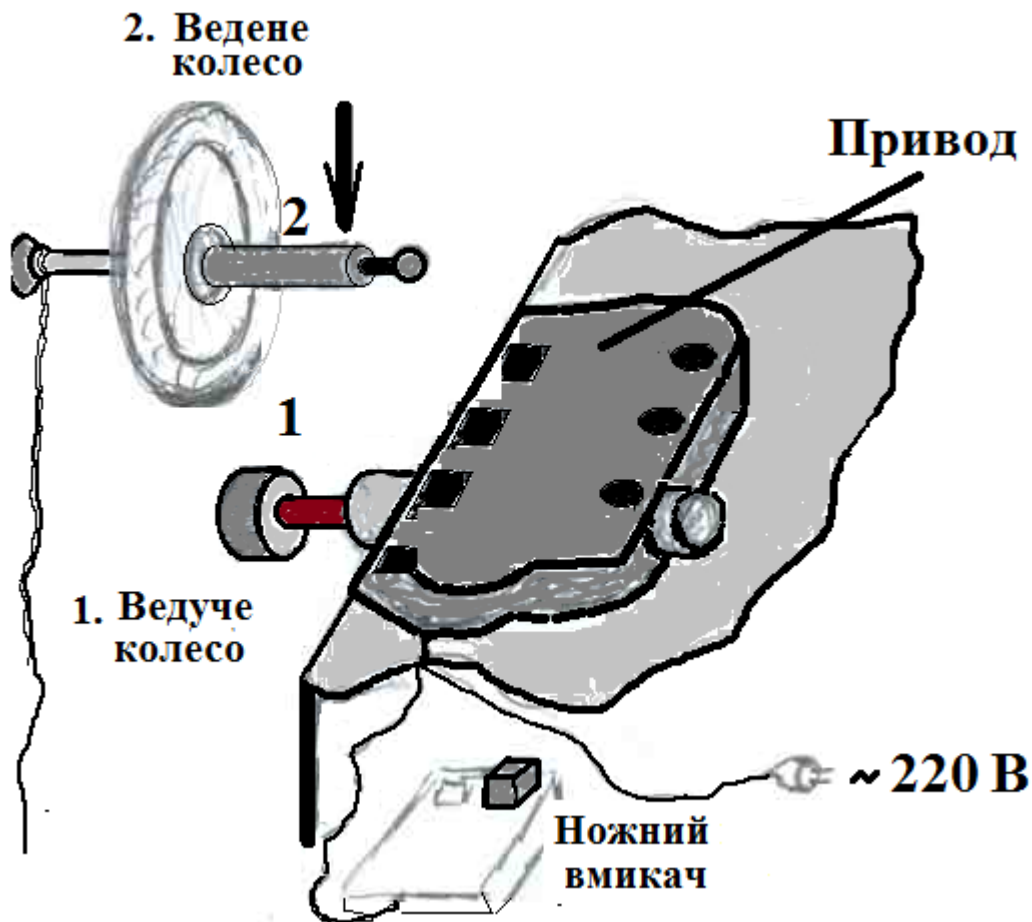
Лектор показує, аудиторії дзигу, що не обертається, і пояснює, для чого коліщатко дзиги має потовщення вздовж обіду.



Потім демонстратор стає правим боком до аудиторії і спирається боком об стіл. На ближній до аудиторної дощі край столу кладуть моторчик з ведучим колесом так, щоб це колесо звисало зі

столу (див. рис). Ребром долоні правої руки демонстратор спирається на плоску частину моторчика і притискає її до столу. Пальцями цієї ж правої руки тримає кульку на кінці осі гіроскопа.

Лівою рукою демонстратор тримає інший кінець осі гіроскопа, до якої прив'язана нитка. Нитка вільно звисає. Ногою демонстратор натискає педаль пуску моторчика. Не відпускаючи педаль, плавно наближає (див. рис.) ведене колесо дзиги (з шорсткою поверхнею) до ведучого колеса моторчика (з прогумованою поверхнею) до їх контакту. Збільшуючи силу контакту, розкручують дзигу до потрібної швидкості.



Коли гіроскоп набере потрібні оберти, прибирають ногу з педаль.

Демонстратор бере дзигу за кінець нитки, що звисає, і піднімає його перед аудиторією на рівень грудей. Відбувається прецесія дзиги.

Після декількох повних кіл прецесії беруть дзигу за кінець осі, до якої прив'язана нитка, і ставлять дзигу вертикально на демонстраційний стіл.

Дзига, що обертається дзига не падає і коштує рівно.

Увага. Не допускайте падіння дзиги зі столу! Краще прибрати дзигу зі столу, не чекаючи її зупинки!

Потім розкручується приводом гіроскоп з горизонтальною віссю в кардановому підвісі. В цьому випадку беруть в руки моторчик і маніпулюють ведучим колесом. Ногою включають педаль пуску моторчика і притискають його ведуче колесо до нерухомо закріпленого в обоймі веденого колеса. Тут потрібна велика вправність і спритність рук! Можна розкрутити гіроскоп одному демонстраторові, а можна залучити другого демонстратора (лектора), щоб той тримав обойму гіроскопа, поки перша людина притискає ведуче коліщатко до веденого.

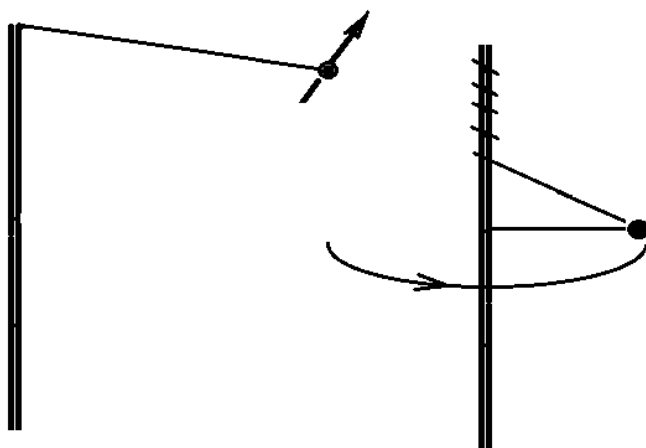
Коли гіроскоп розкручений, беруть допоміжну нитку обома руками і намагаються злегка натиснути нею на горизонтальну вісь ближче до противаги. Натискають вертикально - вісь йде горизонтально, діють на вісь горизонтально - вісь повертається вертикально.

Вказівка. Розкручування обох гіроскопів вимагає певної вправності і зусиль. Якщо досліди демонструє жінка, в цілях безпеки краще дослід не показувати. Лектор-чоловік при бажанні продемонструвати дослід повинен заздалегідь кілька разів провести тренування.



1.22. Паличка з прив'язаним на кінці нитки кулькою («маятник змінного радіуса»)

Дослід. Тримавши в лівій руці стрижень «маятника», правою рукою відводять в сторону кульку і натягують нитку так, щоб вона утворила зі стрижнем майже прямий кут. Потім різко штовхають кульку.



У міру намотування нитки кулька наближається до стрижня, момент інерції кульки зменшується, а швидкість обертання зростає. Особливо добре це помітно в кінці досліду, коли радіус кола, що описує кулька, стає малим.

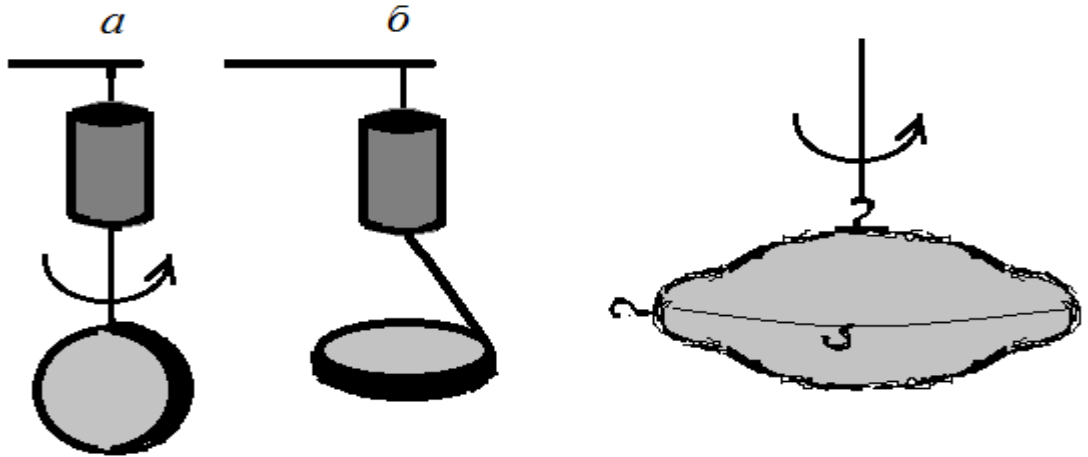
1.23. Обертання тіл різної форми. Вільні осі обертання

Прилади. На стійці закріплений невеликий електромотор, вісь обертання якого розташована вертикально. До осі прикріплена капронова нитка з гачком, що висить вертикально. До гачка можна підвішувати різні тіла: циліндричний стрижень, диск, еліпсоїд, ланцюжок.

Дослід. Підвішують різні тіла. Диск підвішують за край, стрижень - за кінець, ланцюжок - за одну з ланок, у еліпсоїда є три варіанти підвісу.

За допомогою ЛАТРу поступово додають обертів мотору.

Спочатку обертання відбувається з невеликим числом обертів.



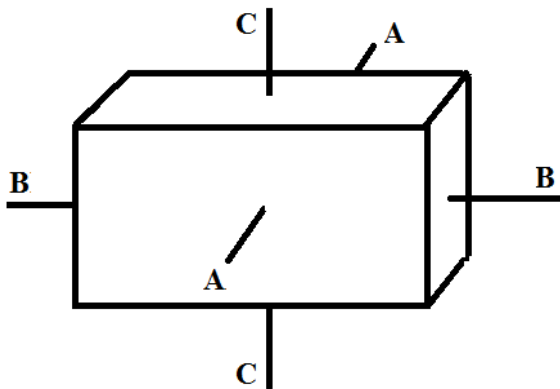
Тіла обертаються нестійко. Потім у міру додавання обертів мотору тіла поступово приймають стійке положення - обертання відбувається навколо осі з найбільшим моментом інерції. Всі тіла поступово займають горизонтальне положення, обертаючись навколо осі, що проходить через центр ваги тіла.

У тому числі ланцюжок, розширюючись при обертанні, приймає форму кільця, зберігаючи на час обертання жорсткість.

Підключення приладів. Електромотор підключається до виходу ЛАТРу. Напруга подається поступово від 0 до приблизно 30 В, при цьому безперервно спостерігають за стійким обертанням підвісок, вносячи корективи.

1.24. Обертання коробки навколо вільних осей

Прилади: порожня коробка з картону, що має форму паралелепіпеда розміром приблизно 30 см x 20 см x 5 см.



Дослід. Спочатку підкидають коробку, надаючи їй одночасно швидке обертання навколо осі AA (див. рис.). Ось AA є віссю, відносно якої момент інерції найбільший. Коробка під час польоту обертається стійко, зберігаючи незмінним напрямком осі AA .

Потім коробку підкидають, надаючи їй обертання навколо осі BB . Осі BB відповідає найменший момент інерції. Це

обертання також є стійким.

Нарешті, підкинувши коробку і надавши їй обертання навколо осі CC , спостерігають нестійке обертання. Осі CC відповідає проміжне значення моменту іне-

рції. Коробка рухається нерівно, змінюючи напрямок осі CC в просторі, як би «перекидаючись» в повітрі.

Вказівка. Кришку коробки заклеюють, щоб при киданні вона не розкривалася.

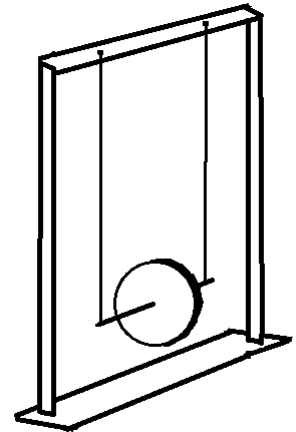
1.25. Маятник Максвелла

Прилад складається з масивного диска, до кінців осі якого прив'язані два шнура. За кінці цих шнурів маятник підвішують до стійки.

Дослід. Якщо маятник підняти, намотавши шнури на вісь, а потім відпустити, то під дією ваги диск буде опускатися, а шнури розмотуватися з осі. У нижній точці потенціальну енергію можна прийняти рівною нулю, зате кінетична енергія є максимальною. У нижньому положенні диск обертається за інерцією в тому ж напрямку, а шнури намотуються на вісь, внаслідок чого маятник піднімається.

Пояснення досліду. Дослід ілюструє закон збереження енергії. Потенціальна енергія маятника вгорі переходить в кінетичну енергію внизу і навпаки.

Вказівка. Обидва шнура спочатку треба намотувати на вісь симетрично. Вісь у верхньому положенні має бути строго горизонтальною.



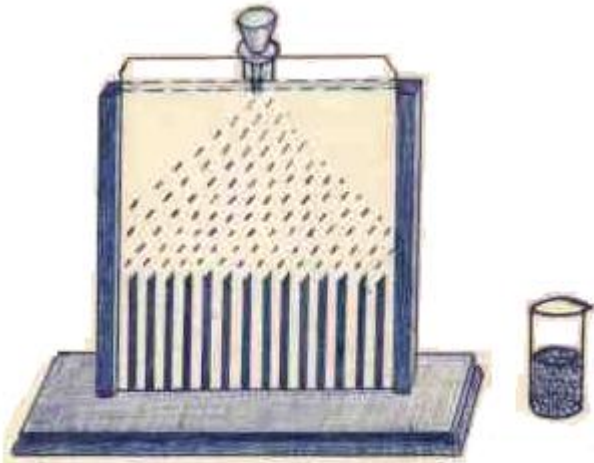
Частина 2

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА И ТЕРМОДИНАМІКА

2.1. Дошка Гальтона. Встановлення статистичних закономірностей

Прилади. Дошка Гальтона являє собою вертикальну дошку, в яку в шаховому порядку вбиті гвоздики без капелюшків. Під ними знаходиться ряд вертикальних комірок, розділених перегородками. По центру зверху встановлюється воронка. Все це прикрите склом.

Дослід. Спочатку в воронку опускають одну маленьку кульку. Її траєкторія - випадкова подія. Звертають увагу аудиторії на рух кульки. Потім послідовно кидають ще пару кульок. Вони падають в різні комірки.



Ставиться питання: чи можна за цими трьома дослідом визначити ймовірність попадання наступної кульки в ту чи іншу комірку?

Відповідь - ні. Треба виконати велику кількість дослідів (аналогічно - кидання монети «орел» - «решка»). Щоб встановити закон ймовірності, треба повторювати кидання монети сотні і тисячі разів.

Беруть склянку з пшоном. Акуратно (тобто не поспішаючи, інакше заб'ється воронка) сиплють пшоно до тих пір, поки не висиплеться весь стакан. Рівень пшона набирає вигляду стовпчастої діаграми - гістограми, яку можна апроксимувати гладкою кривою - кривою Гаусса. Цьому розподілу (який зветься нормальним або розподілом ймовірностей випадкової величини) підпорядковуються найрізноманітніші за своєю фізичною природою випадкові змінні. В даному досліді це відхилення від центра.

Лектор коротко говорить про властивості розподілу Гаусса. ($f(x) \sim \exp(-x^2)$) Наприклад, добре моделюються нормальним розподілом такі випадкові величини, як відхилення кулі при стрілянині по мішені; похибки вимірювань і ін. При вимірюваннях помилка в більшу або меншу сторони є рівноймовірними. Велика похибка малої ймовірності і т.д.

Тепер якою буде відповідь на поставлене запитання? Аудиторія допомагає

...

Виникає питання. Причому тут молекули? Відповідь. Для встановлення статистичних закономірностей в розподілі молекул за швидкостями необхідно дуже велике число молекул і абсолютно випадковий характер їх зіткнень. Що і має місце.

Вказівка. У демонстраційній аудиторії після закінчення лекції нахилиють прилад над аркушем ватману лицем до аркушу, акуратно висувають трохи вгору передне скло, висипають пшоно на аркуш ватману і виймають окремо кульки в баночку, окремо пшоно в склянку.

2.2. Адіабатне розширення. Утворення туману

Прилади. Великий скляний балон, який щільно закривається гумовою пробкою. Знизу в балон входить шланг від насоса. На дно балона наливають дуже небагато води, щоб створити атмосферу насичених парів. Перед дослідом балон похитують в руках так, щоб вода обмила стінки зсередини. Ручний насос з'єднаний з балоном на нагнітання повітря в балон.

Дослід. Збирають установку: насос, гумова трубка від виходу насоса до балона, пробка балона закрита і притримується рукою. Нагнітають повітря всередину балона (запрошується на допомогу студент). Роблять 20 -30 накачувань, припиняють накачувати повітря, роблять паузу, притримуючи рукою пробку, і звертаються до аудиторії: «При раптовому розширенні процес можна вважати адіабатним. Має знизитися температура повітря в балоні. На дні балона є вода. Водяна пара стане насичуючою і в балоні повинен утворитися туман ». Після цих слів швидко виймають пробку. Пробка відкривається з шумом. *Але туман не утворюється!*



Лектор пояснює: «Туман - це крапельки води. Вони легше зароджуються на твердих частинках, зважених в повітрі - пил, дим і т.д. У чистому повітрі їх зростання є утрудненим. «Забруднимо» повітря».

Демонстратор запалює сірник, кидає його в балон так, щоб легкий димок від згаслого сірника було видно. Краще кинути пару сірників.

Всі дії повторюються спочатку. Нагнітають повітря. Швидко відкривають пробку. Шумовий ефект. І весь балон затягує туманом.

Примітка. Після досліду балон промивають, видаляючи бруд з його дна.

2.3. Адіабатне стиснення. «Повітряне кресало»

Прилади. Прозорий товстостінний циліндр з поршнем, укріпленим на штоку.

Дослід. Спочатку продувають спринцівкою циліндр кресала від минулих дослідів – необхідно «провітрити» порожнину циліндра. Потім на дно циліндра опускають невеликий шматочок вати, злегка змочений ефіром, і закривають циліндр поршнем. (Іноді вата прикріплюється прямо до поршня).

Тримаючи горизонтально на прямих витягнутих руках в затемненій аудиторії кресало, різко всувають поршень. В кінці ходу поршня видно яскравий спалах ефіру.

(Більш легкий у виконанні варіант для жінок-демонстраторів - спирають прилад вертикально на стіл і різко всувають вертикально вниз поршень всередину циліндра.)

Повітря при швидкому стискуванні сильно нагрівається, і пари ефіру спалахують. Під час демонстрації досліду корисно частково затемнити аудиторію, тоді

спалах парів буде особливо чітко видний студентам. Описаний дослід дуже добре ілюструє запалювання робочої суміші в дизельному двигуні.

Примітка. Ефір перестали продавати в аптеках. Можна застосовувати легкозаймисті речовини - спирт і ін..

2.4. Перехід ефіру через критичний стан

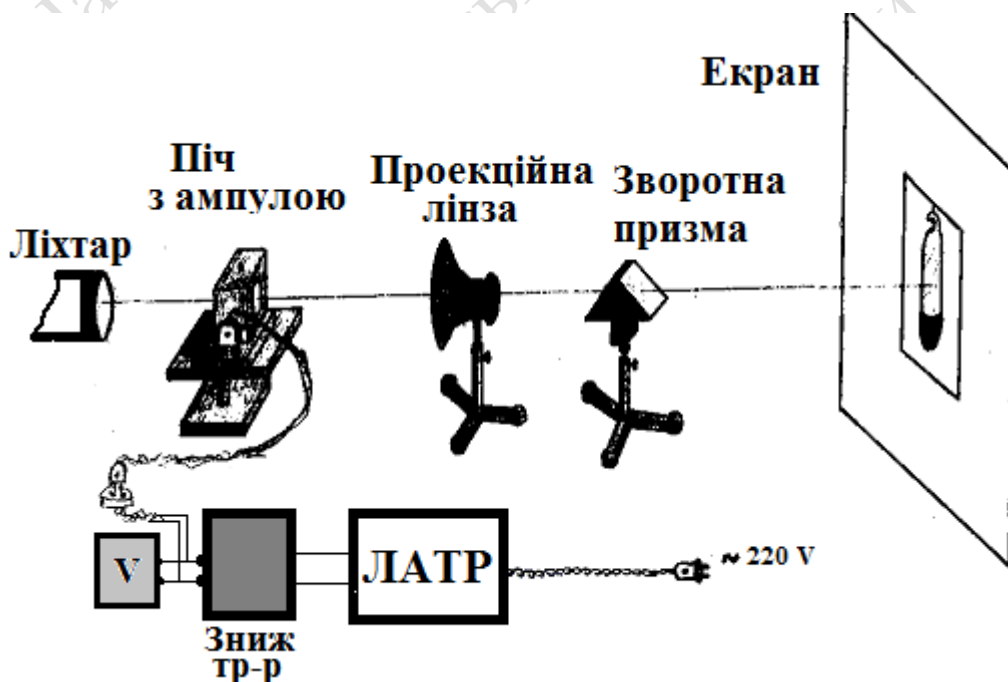
Прилади. Ампула з ефіром, електрична піч, проєкційний ліхтар, об'єктив, що проєктує, зворотна призма, екран.

Дослід.

Спочатку лектор малює на дошці сімейство ізотерм реального газу. Проводить від точки $V_{кр}$ на осі об'ємів вертикально вгору лінію, яка перетинає критичну ізотерму в критичній точці. Під час ізохоричного ($V = const$) нагрівання рідини (що відповідає рухові на рисунку на дошці вздовж прямої вертикально вгору) і відповідному підборі маси рідкої фази можна пройти через критичний стан.

Спостерігати перехід речовини через критичний стан можна при нагріванні ефіру в запаяній ампулі. (Метод, що викладається, був розроблений в Київському університеті видатним українським фізиком М.П. Авенаріусом).

Ампула з етиловим ефіром ($t_{крит} = 193,8 \text{ } ^\circ\text{C}$) запаяна і поміщена в нагрівач. Під час підготовки досліду в ампулу вводиться така маса ефіру, об'єм якої в кри-



тичному стані дорівнює внутрішньому об'єму ампули.

Межею, що відокремлює рідину від пари, є вільна поверхня рідини. Наявність цієї поверхні дає можливість точно вказати, де знаходиться рідка фаза речовини, і де газоподібна. Таке різке розхо-

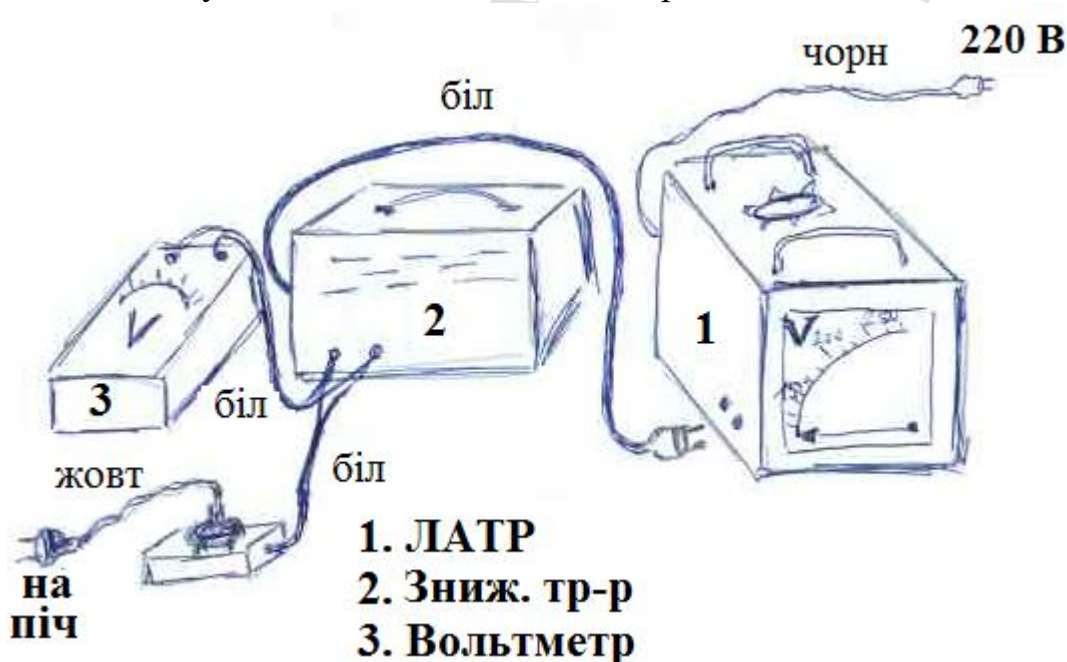
дження між рідиною і її паром пояснюється тим, що густина рідини є в багато разів більшою, ніж у її пари. Якщо в звичайному стані кількість молекул в одному см^3 в газах $n = 10^{19} \text{ 1/см}^3$, то в рідинах $n = 10^{22} \text{ 1/см}^3$, тобто відрізняється в 1000 разів.

Спочатку включають світло, яке проходить через ампулу, проєктують ампулу на екран і спостерігають на екрані дві фази ефіру - рідину і зверху рідини пару.

Потім включається піч і відбувається нагрів. Густина рідини внаслідок розширення зменшується, а густина пари над нею збільшується (нагадаємо - ампула запаяна!). Відбувається кипіння ефіру.

У міру наближення до критичної температури меніск стає плоским, поверхневий натяг перетворюється в нуль. Нарешті, **меніск зникає**, і весь ефір переходить в газоподібний стан. У критичному стані зникає різниця між рідиною і її парю.

Оскільки нагрів йде швидко і критичний стан можна проскочити, дослід краще **спостерігати під час охолодження** від температури вище $T_{\text{крит}}$ до кімнатної, яке відбувається повільніше, ніж нагрівання.



Вимикають піч, ампула повільно остигає в повітрі, і спостерігають на екрані зворотний процес. (На дошці лектор показує вертикаль через всі ізотерми зверху вниз через критичну точку - процес охолодження є ізохоричним).

цес охолодження є ізохоричним).

Як побачити момент критичного стану? При проходженні світла через речовину в критичному стані світло розсіюється, і ампула на мить чорніє. При подальшому охолодженні спостерігається вже двофазний стан ефіру - крапельки рідини стікають на дно ампули, знизу накопичується рідина з явно видимим меніском, зверху її пара.

Вказівки для лекційного демонстратора.

Дослід демонструють у вертикальній проєкції зі зворотного призмою. Схема досліду показана на рисунку.

Нагрівач - так звана «повітряна лазня» - являє собою невеликий ящик з заліза зі знімною кришкою, в кришці є отвір для пробки, до якої підвішується ампула з ефіром. Довжина товстостінної скляної ампулки 3 - 5 мм, зовнішній діаметр близько 5 мм. Зверху - гачок для підвішування в повітряній лазні. У передній і задній стінках ящика є два скляних віконця з товстого скла (5 - 6 мм) для пропускання світла від проєкційного пристрою. Нагрівання повітря в лазні проводиться пропусканням струму через спіраль з ніхрому, укріплену всередині ящика біля його дна. Дроти повинні мати загальний опір 60 Ом, діаметр 0,3 мм, сила струму приблизно 2 А.

Напруга до спіралі нагрівача підводиться через ЛАТР від мережі 220 В, 50 Гц. Поступово поворотом ручки ЛАТРа збільшують напругу на печі (дивляться на показання вольтметра 3 на рисунку) *від нуля* і спостерігають за ампулкою на екрані. У момент початку закипання ефіру припиняють збільшувати напругу. Зазвичай це становить близько 67 В. *Більше не подавати!* Рівень ефіру починає рухатися до верхнього кінця ампулки. Коли меніск зникає, вимикають піч. Ампула починає повільно остигати. Нарешті, при проходженні критичного стану, ампула раптово чорніє.

2.5. Властивості рідкого азоту

Прилади: рідкий азот в посудині Дьюара, тонкостінний стакан, свинцевий дзвіночок, шматки гуми, шматок дерев'яної дошки, молоток.

Дослід. Рідкий азот являє собою безбарвну рідину. Для демонстрації властивостей рідкого азоту слід налити його з посудини Дьюара в тонкостінний скляний стакан. Лектор нагадує, що температура рідкого азоту - 195,7 °С.

За низьких температур змінюються механічні властивості речовин.

У склянку з рідким азотом пінцетом опускають: шматок гумової трубки, свинцевий дзвіночок (попередньо демонстратор марно намагається змусити його дзвеніти), шматочки гумової пластинки, нарізаною у формі невеликих клинів, і, якщо є можливість, невелику квітку.

Після припинення бурхливого кипіння всі зазначені предмети виймають по черзі пінцетом.

Гума, охолоджена до температури рідкого азоту, стає крихкою. Шматок гумової трубки можна ударом молотка на ковадлі розбити на шматки.

Ефектно виглядає забивання «цвяхів» (гумових клинів) в дерев'яну дошку. В кінці лекції бажаючі можуть торкнутися гумових клинів, забитих в дошку.

Вийнятий з рідкого азоту свинцевий дзвіночок внаслідок підвищення у свинця пружності дзвенить. Нарешті, вийнята останньою квітка, кинута з невеликої висоти на стіл, розбивається, як скляна, на дрібні шматки (дослід П.Л. Капіці).

На закінчення можна хлюпнути рідким азотом, що залишився в склянці, на демонстраційний стіл. Краплі рідини інтенсивно випаровуються, покриваються газовими оболонками і швидко розбігаються на газових подушках на всі боки.

Можна також обережно хлюпнути рідким азотом на руку (по дотичній до випрямленої долоні). За рахунок повітряної подушки, що виникає під час інтенсивного випаровування рідини, рука не отримає переохолодження.

2.6. Дифузія в газах

Прилади. Горизонтально розміщена скляна труба, закрита з одного боку наглухо, з іншого боку - пробкою. Скляна пластинка. Промокальний папір, нашати-рний спирт, фенолфталеїн.

Дослід. На скляну пластинку накладають промокальний папір білого кольору, просочений розчином фенолфталеїну, і поміщають її в скляний циліндр, один з торців якого закритий наглухо.

Циліндр укріплений на спеціальному штативі. Закривають циліндр пробкою, на якій міститься шматочок вати, змоченої в нашатирному спирті.

Аміак дифундує уздовж циліндра, і папір поступово забарвлюється в малиновий колір.

Повітря всередині циліндра є ізольованим від навколишнього впливу, таким чином конвекція виключається. Відбувається дифузія аміаку уздовж циліндра. Індикаторний папір поступово набуває малинового забарвлення.

Відсувають прилад в сторону. Поки йде показ інших дослідів, на нього не звертають уваги. Через деякий час показують аудиторії, що пара аміаку за рахунок дифузії досягла кінця циліндра - весь індикаторний папір став малиновим.

Приготування фенолфталеїнового розчину.

Фенолфталеїн - 1 г

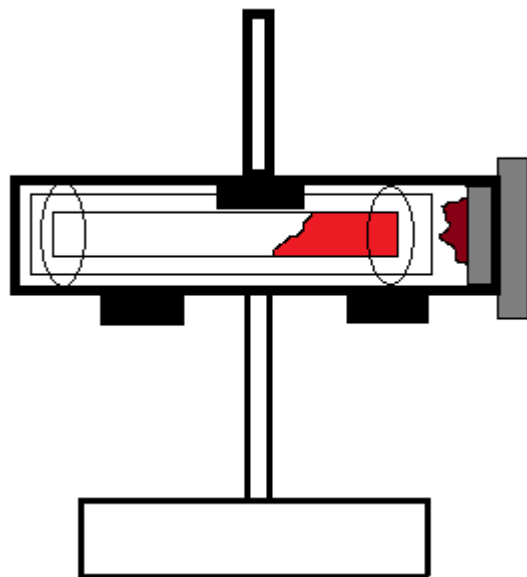
Етиловий спирт - 100 г.

Вода - 100 г

2.7. Дифузія газів через пористу стінку

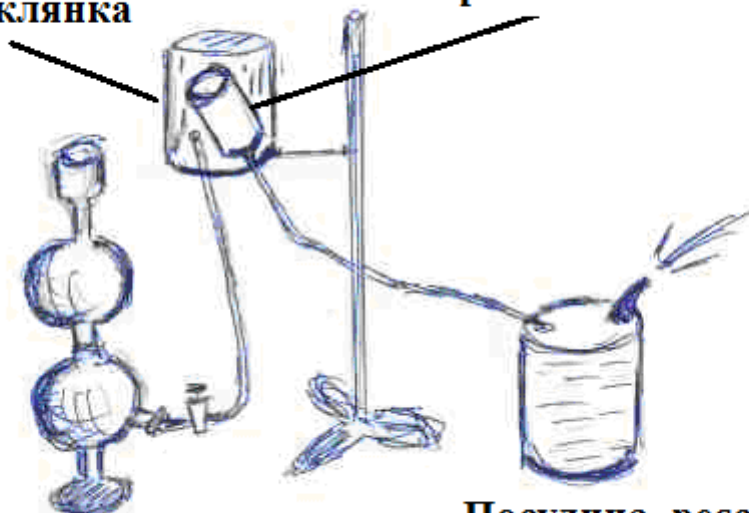
Прилади: пористий стакан для демонстрації дифузії газів, скляна посудина з підфарбованою водою для демонстрації надлишкового тиску, гумові трубки, прилад для отримання водню (апарат Кіппа), стакан хімічний.

Дослід. Пористий циліндр з'єднують гумовою трубкою з посудиною-реєстратором тиску. Циліндр повертають денцем вгору і накривають невеликою хімічною склянкою. У склянку вводять водень з апарату Кіппа (водень легший за повітря і він накопичується вгорі) і спостерігають, як з посудини-реєстратора фонтанчиком вихлюпується вода.



**Перевернута
хімічна склянка**

Пориста склянка



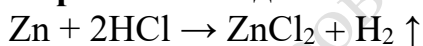
**Фонтанчик
води**

Апарат Кіппа

**Посудина-реєстратор
тиску**

Пояснення. Середня швидкість руху молекул водню за однакових умов значно вище, ніж швидкість руху більш масивних молекул азоту і кисню, що утворюють повітря. Останні виходять з циліндра в меншій кількості, ніж проникають туди більш рухливі молекули водню. Тому всередині циліндра створюється тиск, який і реєструє фонтанчик води, що виникає.

Отримання водню.



Апарат Кіппа виготовляється зі скла і складається з декількох частин:

1. Колба-реактор з резервуаром;
2. Воронка з довгою трубкою;
3. Газовідвідна трубка;
4. Пастка для уловлювання парів кислоти (наприклад, соляної).



Колба-реактор має верхню кулеподібну частину з тубулусом, в який вставляється газовідвідна трубка, що обладнана краном або затискачем Мора, і нижній резервуар у вигляді напівсфери. Нижній резервуар і колба-реактор розділені гумовою або пластиковою прокладкою з отвором, через який проходить в нижній резервуар довга трубка воронки, яка доходить майже до дна.

Розчин в нижньому резервуарі приладу служить затвором, що перешкоджає виділенню газу назад через воронку під час дослідів. Нижній резервуар зазвичай має тубулус, закритий

притертою скляною пробкою: він необхідний для зливу рідини після використання приладу.

На прокладку через бічний тубулуш шпателем насипають тверді речовини (мармур, цинк, алюміній, сульфід натрію, сульфід натрію). Тубулуш закривається пробкою з газовідвідною трубною. Потім при відкритому крані або затиску в верхню лійку заливається розчин реагенту. Коли рівень рідини досягає речовини на прокладці, починається хімічна реакція з виділенням газу.

При закритті крана тиск газу, що виділяється, видавлює рідину з реактора в верхню частину воронки. Реакція припиняється. Відкриття крану призводить до відновлення реакції. Таким чином, апарат Кіппа відноситься до апаратів автоматичної дії.

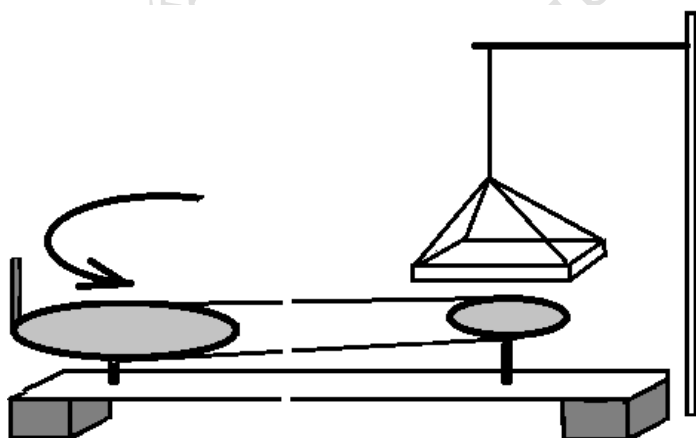
2.8. Внутрішнє тертя в газах

Прилади: відцентрова машина і підвішена на штативі пластина пінопласта.

Дослід. Демонстрацію внутрішнього тертя в повітрі показують за допомогою легкої пластини пінопласту, підвешеною на нитці. Під пластиною встановлюють відцентрову машину так, що її обертовий диск міститься на відстані 1,5 - 2 см від пластини. Обертають приводне колесо відцентрової машини і спостерігають, як завдяки наявності сил внутрішнього тертя в шарах повітря, що знаходиться між диском машини і пластиною пінопласту, остання повертається, закручуючи нитку підвісу. Для зручності спостереження за поворотом пластини до неї приклеюють прапорець.

Сили внутрішнього тертя пропорційні градієнту швидкостей. Градієнт швидкості можна змінювати, регулюючи частоту обертання відцентрової машини або змінюючи відстань між її диском і пластиною.

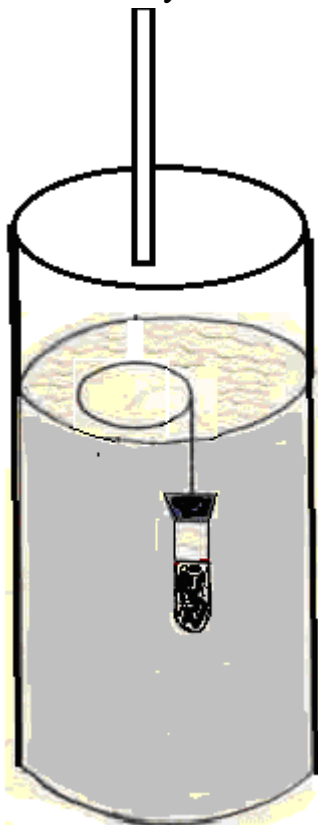
Якщо помістити між диском відцентрової машини і пінопластом великий лист скла, сили внутрішнього тертя не зможуть закручувати підвішену пластину пінопласту.



2.9. Поверхневий натяг. Поплавок Архімеда

Прилади: Банка з водою, поплавок Архімеда, скляна паличка.

Дослід. Велика скляна банка заповнюється водою приблизно на $5/6$ об'єму. Опускають у воду поплавок Архімеда, який має вигляд пробірки, заповненої наполовину свинцевим грузилом. Зверху поплавок оснащений дротяною петлею.



Поплавок повільно занурюється до пробки. Петля при цьому знаходиться вище рівня води в повітрі.

Потім скляною паличкою обережно утоплюють поплавок настільки, щоб петля поринула нижче рівня води. Повільно відпускають поплавок догори - і ось поверхня води тримає петлю силою поверхневого натягу і не дає поплавцю вийти вище.

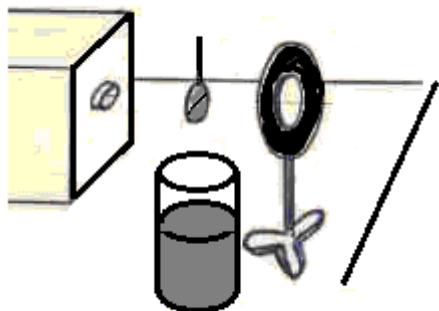
Лектор пояснює: поверхневий шар рідини за своїми властивостями нагадує пружну плівку.

Скляною паличкою обережно розгойдують поплавок. Плівка не рветься. Нарешті, за великої амплітуди коливань вона проривається, поплавок спливає, і петля підноситься над водою.

2.10. Поверхневий натяг. Мильні плівки

Прилади: Проекційний апарат ЛЕТІ-60 М з проектуючим об'єктивом. (Заміна - діапроектор «Світязь-Авто»). Дротові каркаси. Мильна вода. Голка.

Дослід. 1 варіант. Між проектором і проекційним об'єктивом по черзі поміщають вертикально дротові каркаси різної форми (лівий рисунок). Занурюючи їх в мильну воду, показують в проекції на екран, як вода зтягує каркаси.



2 варіант. У разі виходу з ладу проектора ЛЕТІ, використовується горизонтальний проектор (кодоскоп) ЗМ 1720 з поворотним дзеркалом (правий рисунок). В цьому випадку каркаси тримають горизонтально.

Демонструють:

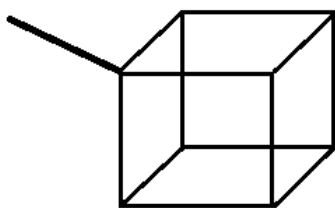
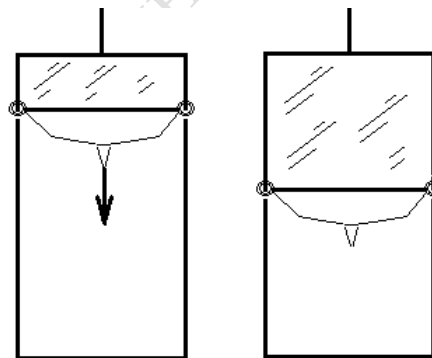
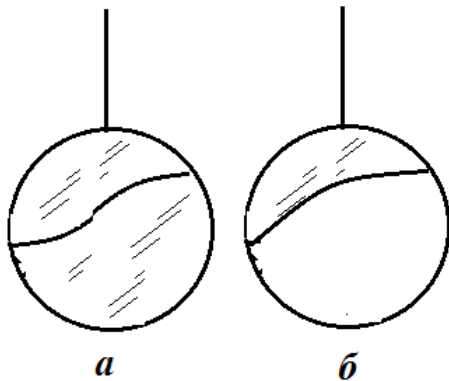
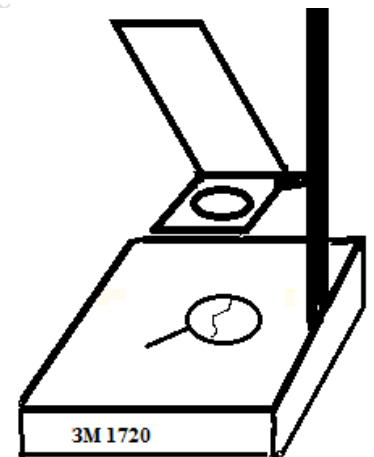
1. Кільце з плаваючою перемичкою. Якщо проткнути голкою частину плівки, решта натягнеться у вигляді півмісяця (рис. а, б).

2. Дротяна рамка з рухомою стороною. Відтягуючи і відпускаючи рухливу сторону, спостерігаємо прагнення плівки скоротити площу поверхні - плівка піднімає вгору рухливе ребро рамки.

3. Дротяний куб і дротова спіраль зтягуються «економно», тобто з мінімальною площею поверхні.

Примітка. Рідину для мильних плівок виготовляють з мильної стружки (добре - дитячого мила) або мильного порошку в кількості 2-3% від маси води.

Під час демонстрації на горизонтальному проекторі мильна вода капає на дзеркало проектора. Необхідно застатися м'якою вологою ганчіркою, щоб збирати мильну воду і не пошкодити дзеркало.



2.11. Змочування і незмочування. Капіляри

Прилади: діапроектор ЛЕТІ-60 (або «Світязь. Авто»); проєкційний об'єктив; обертова призма; екран; посудина з підфарбованою водою; капіляри на штативі:

- набір прямих скляних трубок різного діаметра;
- U - подібна трубка зі ртуттю і різними за діаметром колінами.

Дослід. Проектують на екран по черзі капіляри.



Спочатку вертикальні трубки. Підносять плоску посудину з підфарбованою водою до трубок знизу, занурюють кінці трубок.

Вода піднімається на різну висоту в залежності від діаметра капіляра. Чим вужче капіляр, тим вище стовп води.

Потім проектують на екран U-подібну трубку зі ртуттю. У широкому коліні рівень ртуті є вищим, оскільки кривина меніска є меншою.

2.12. Модель флотації

Флотація (фр. *flottation*, від *flotter* - плавати) - один з методів збагачення корисних копалин, який заснований на відмінності здібностей мінералів утримуватися на міжфазній поверхні, яка обумовлена різницею в питомих поверхневих енергіях. **Гідрофобні** (що змочуються водою погано) частинки мінералів вибірково закріплюються на межі поділу фаз, зазвичай газу і води, і відділяються від **гідрофільних** (добре змочуваних водою) частинок. **Під час флотації бульбашки газу або краплі олії прилипають до частинок, що погано змочуються водою і піднімають їх до поверхні.** Для утворення бульбашок використовують різні методи, наприклад, утворення вуглекислого газу за рахунок хімічної реакції.

Прилади. Акваріум з водою. Поплавці. Оцтова кислота. Сода. Піпетка.

Дослід. В акваріумі з водою у самого дна плавають два поплавця у вигляді перевернутих маленьких колб різного кольору. Червона колбочка імітує корисну копалину (гідрофобна частинка мінералу), вона не змочується водою, тому що заздалегідь покрита парафіном.

Безбарвна колбочка імітує порожню породу, яку необхідно відокремити від мінералу. Вона змочується водою (гідрофільна частинка) - її скляна поверхня очищена.



В акваріум насипають соду ближче до червоної колбочці. Потім піпеткою набирають оцтової кислоти, занурюють піпетку і видавлюють кілька крапель в воду (також ближче до червоної колбочці). Сода взаємодіє з кислотою і виділяється вуглекислий газ. Бульбашки вуглекислого газу прилипають до червоної колбочці і піднімають її вгору. Безбарвна колбочка залишається внизу.

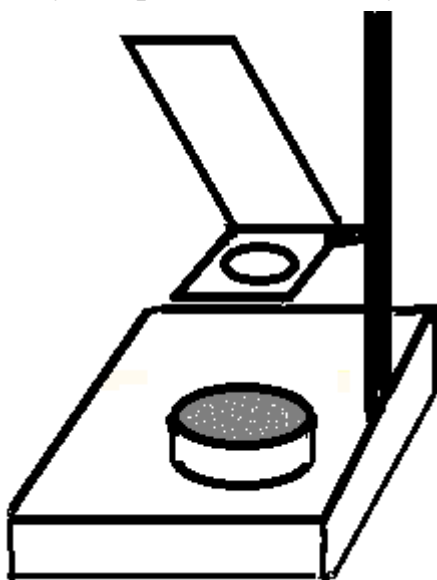
Пояснення досліду. У промислових умовах разом з бульбашками газу в піну виносяться частинки корисної копалини, а пуста порода залишається на дні ванни.

Примітка. Для покриття колбочки парафіном слід на скляну пластинку розплавити парафін і прокатати колбу по ньому.

2.13. Властивості поверхневого шару рідини

Прилади: кодоскоп «Полілюкс», кювета плоска прозора, вода, порошок лікоподію (сірки, крейди), голка, спиртівка, камфора, мило.

Дослід. Наливають в кювету воду, посипають лікоподієм поверхню так, щоб не було просвітів. Кювету ставлять на проектор, висвітлюють знизу і проєктують на великий екран. Фокусують на екрані поверхню води.

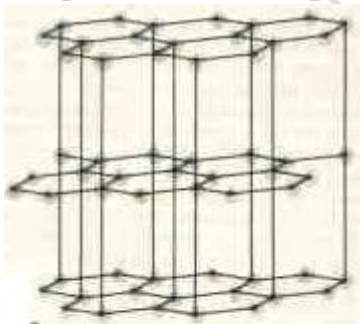


1. На кінчик голки (або скляної палички) зішкрябають шматочок мила. Цим кінчиком торкаються в будь-якому місці до поверхні. Тут поверхневий натяг різко зменшується. Порошок розбігається на всі боки, утворюючи «вікна».

2. Другий варіант – у полум'ї запальнички нагрівають кінчик голки і теж торкаються до плівки. Ефект той самий.

3. Рух камфори. Попередньо вимивають кювету під сильним струменем водопровідної води. До внутрішньої поверхні кювети не можна торкатися пальцями. Кювету ставлять на прилад і наповнюють свіжою водопровідною водою.

Беруть шматочок камфори за один кінець, а з іншого кінця ножем зішкрябають дрібні шматочки, щоб вони падали на поверхню води. Внаслідок нерівномірної зміни поверхневого натягу відбувається рух шматочків камфори по поверхні води. Чим шматочок дрібніше, тим він рухається енергійніше.



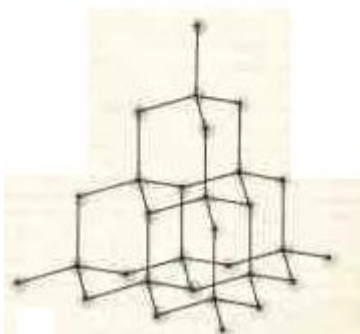
Якщо тепер посипати поверхню лікоподієм, порошок буде розбігатися від частинок камфори, що швидко рухаються. (Іноді ситуацію жартівливо називають «Вовк в стаді овець»).

2.14. Моделі кристалічних ґраток

Прилади: механічні моделі кристалічних ґраток: алмазу, графіту, сплаву залізо-вуглець (об'ємно центрована і гранецентрована комірки).

Дослід ілюструє типи кристалічних ґраток. Лектор зазначає, що поняття кристалічних ґраток дає правильний опис внутрішньої структури кристала.

Демонстрація заснована на механічному моделюванні зв'язків атомів в періодичних структурах. Показуючи сту-



дентам моделі елементарних комірок, визначають їх тип, систему симетрії, дають коротку характеристику типів зв'язків атомів в періодичній структурі.

2.15. Модель пружної деформації твердого тіла



Прилади: моделі деформованого твердого тіла (декілька паралельно розташованих дерев'яних і пластмасових пластин, скріплених пружинами).

Дослід ілюструє зміни, що відбуваються з кристалічною ґраткою твердого тіла під час деформації різних типів: стиску, розтягнення, кручення, а також їх комбінації, наприклад, вигин.

Демонстрація заснована на аналогії між поведінкою атомів, що належать паралельним атомним площинам деформованої кристалічної ґратки, і системою паралельних пластин, з'єднаних між собою пружинами.

Стискають, розтягують і іншим чином пружно деформують модель.

Пояснення дослід. Існує аналогія між цією моделлю і кристалом. Так само, як і в разі кристалічної ґратки, існує деяка відстань між сусідніми шарами, якій відповідає стан стійкої рівноваги системи. Під час зміни цієї відстані виникають сили (відштовхування або притягання), які намагаються повернути систему в початковий стан.

Частина 3

ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

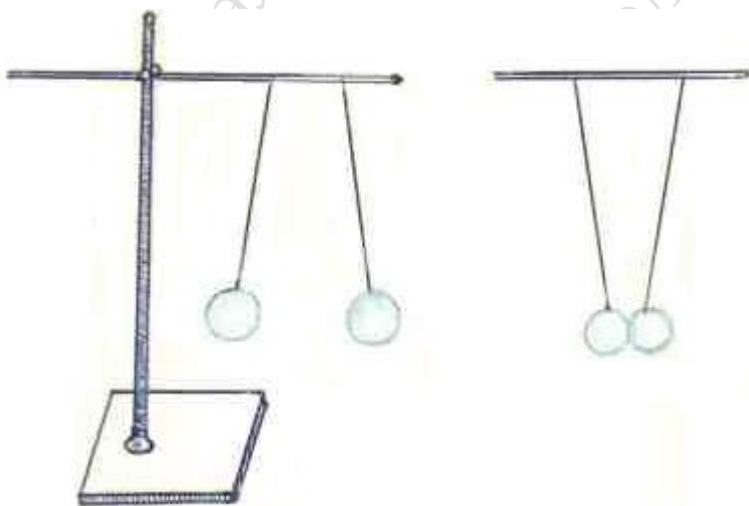
3.1. Елементарні досліди з електростатики. Два види електрики. Взаємодія заряджених тіл

Прилади. Скляна паличка і платівка гуми; пластмасова (або ебонітова) паличка і шматок вовняної тканини. Два електрометри. Кульки з фольги, підвішені на шовкових нитках.

Дослід. На демонстраційний стіл сиплють дрібні шматочки паперу. Підносять наелектризовані ебонітову і скляну палички і спостерігають прилипання шматочків паперу до них.

Натирають скляну паличку листом гуми. Торкаються паличкою і гумовим листом окремо до кульок двох різних електрометрів. Переконаються, що заряди різного знака - позитивні і негативні - виникають як на паличці, так і на шматку гуми. Для цього підносять по черзі, але не торкаються, до кожного з електрометрів, наприклад, скляну заряджену паличку. В одному випадку стрілка електрометрії спадає, в іншому - піднімається.

Притягання і відштовхування зарядів. На штативі на тонких капронових нитках підвішені легкі кульки з фольги. Якою-небудь наелектризованою (наприклад, ебонітовою) паличкою торкаються і заряджають кульки. Крайня кулька підвішена до вузької горизонтальної рухомої скляної трубки, яка входить в ширшу нерухому скляну трубку. Переміщаючи вузьку трубку всередині широкої, можна змінювати відстань між кульками. Повільно зближують заряджені кульки.



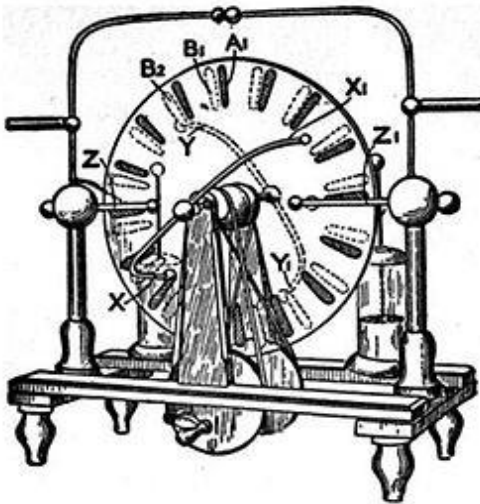
Заряджені однойменно, кульки відштовхуються одна від одної і від палички. Підносять заряджену скляну паличку. Оскільки скляна паличка має протилежний знак заряду, кульки притягуються до неї.

Аналогічно спостерігають притягання кульок, для чого торкаються до одної кульки наелектризованою скляною, а до іншої – пластмасовою (ебонітовою) паличками, а потім, втягуючи скляну трубку нагорі штатива, зближують кульки. При деякій відстані між кульками, вони швидко зближуються до дотику. Після торкання заряди, як правило, нейтралізуються.

3.2. Електрофорна машина

Дозволяє розділяти електричні заряди протилежних знаків і накопичувати їх. Використовує явище електростатичної індукції, при цьому на полюсах машини (циліндричних конденсаторів) накопичуються електричні заряди, різниця потенціалів на розрядниках досягає декількох сотень тисяч вольт. Працює за допомогою механічної енергії.

Схема електрофорної машини Уімсхёрста.



Машина складається з двох співвісних дисків (A - ближній до нас на рисунку і B - дальній від нас) з ізолюючого матеріалу (скло або оргскло), на які наклеєні провідні станиолеві **смужки-сектори** (див. рис.). Диски приводять у зустрічне обертання з однаковою кутовою швидкістю.

Смужки під час обертання дисків стикаються зі щітками X , Y і Z , які грають роль контакту для перенесення зарядів. Провідники Z і Z_1 служать для знімання і накопичення зарядів з обох дисків. Провідники X (на рисунку на ближньому до нас боці машини) і Y (на зворотному

боці) розміщені кожен по одну сторону диска і з'єднують діаметрально протилежні смужки.

Припустимо, що сектор A_1 спочатку несе невеликий надлишковий позитивний заряд, а сектор B_1 - негативний. Коли A_1 рухається вліво, а B_1 - вправо, їх потенціали зростають *за рахунок роботи, що виконується проти сили їх електростатичного притягання*.

Коли A_1 досягає положення навпроти сектора B_2 пластини B , який в цей момент контактує зі щіткою Y , він буде під високим позитивним потенціалом. Сектор A_1 викличе розділення заряду в провіднику, що сполучає Y і Y_1 , перенісши великий негативний заряд на B_2 і великий позитивний заряд на віддалений сектор, якого в цей момент торкається щітка Y_1 .

Рухаючись далі, A_1 торкається щітки Z і частково розряджається в зовнішнє коло (навантаженням служить лейденська банка). При подальшому обертанні дисків, A_1 торкається щітки X , яка пов'язана провідником зі щіткою X_1 , і знову отримує заряд, на цей раз негативний, який

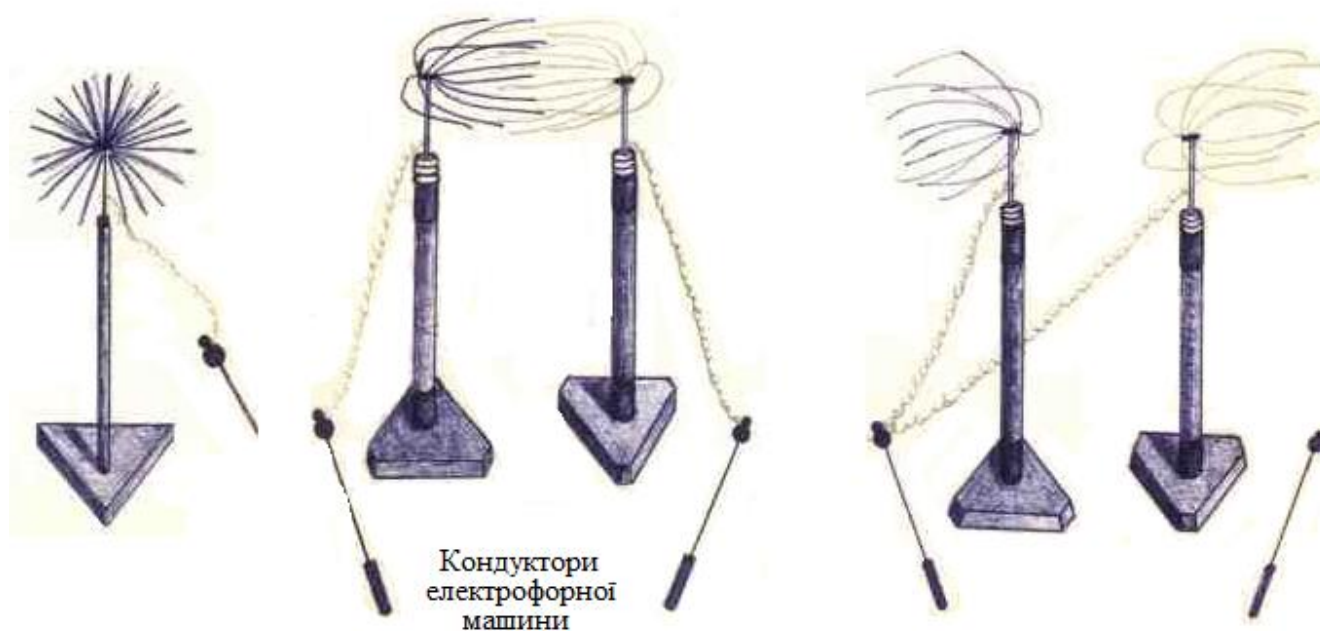


відштовхується негативно зарядженим сектором B_2 (що знаходиться в цей момент напроти сектора на диску A , який має контакт з щіткою X_1). Таким чином, позитивний заряд переноситься справа наліво верхньою частиною диска A , а негативний зліва направо його нижньою частиною.

3.3. Силкові лінії електричного поля (султани паперові)

Прилади: електрофорна машина, паперові султани на ізолюючих штативах, з'єднувальні провідники з «крокодилами» на кінці.

Дослід. За допомогою крокодильчика з'єднують проводом кондуктор електрофорної машини з одним султаном. Обертають диски машини. Звертають увагу на радіальне розташування паперових смужок.

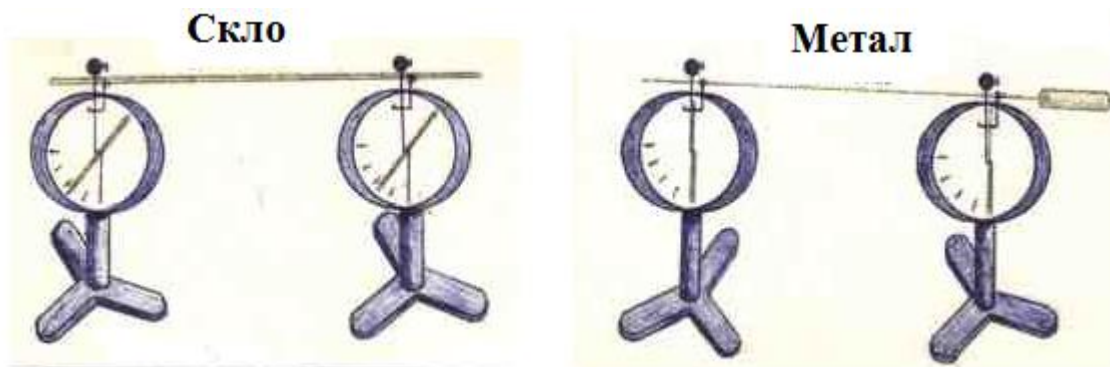


Потім заряджають обидва султани спочатку однойменними, а потім різноіменними зарядами. Для цього з'єднують їх, відповідно, з одним і тим же кондуктором електрофорної машини і з різними. Показують викривлення смужок при відштовхуванні і притяганні.

3.4. Провідники і діелектрики

Прилади. Скляна паличка і платівка гуми; пластмасова (або ебонітова) паличка і шматок вовняної тканини. Два електрометри. Скляна трубочка. Мідний дріт на ізолюючій ручці.

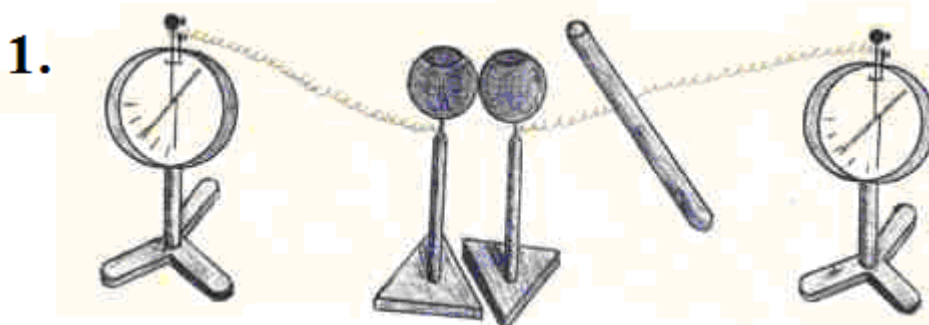
Дослід. Два заряджених різноіменно електрометри з'єднують: мідним дротом на ізолюючій ручці, і скляною трубочкою. У разі провідника заряд спадає. У разі діелектрика - тримається.



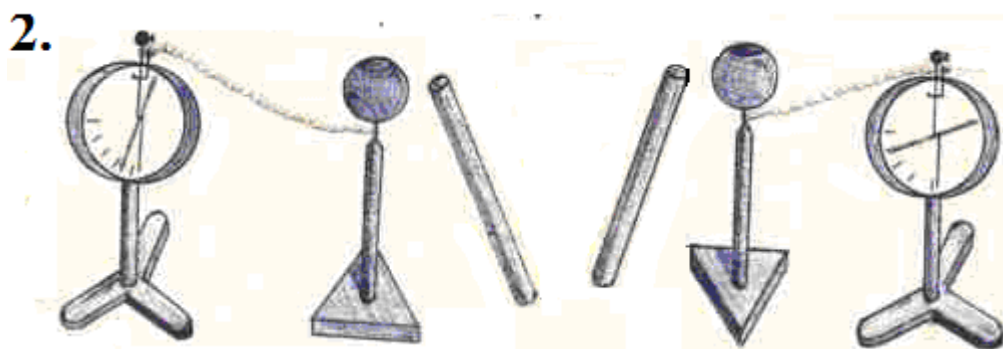
3.5. Електризація через вплив (електростатична індукція)

Прилади. Дві пустотілих металевих кулі на ізолюючих підставках. Два електрометри. Скляна та пластмасових палички, клапоть гумової і вовняної тканини. Мідний дріт на ізолюючої ручці.

Дослід. Зсунувши спеціальні несиметричні трикутні підставки куль, з'єднують кулі до торкання (чутний дзвін куль) так, щоб вони утворили єдиний провідник. Кожну з куль з'єднують зі своїм електрометром. Електрометри нічого не показують, тому що кулі не заряджені.



Підносять збоку до однієї з куль, але не торкаються, заряджену паличку. Обидва електрометрії показують заряди, що з'явилися (див. рис. 1). Розсовують кулі в присутності зарядженої палички. Заряди на електрометрах зберігаються. Переконаються в тому, що вони різних знаків (рис. 2), для чого підносять до кожної кулі по черзі скляну і пластмасову заряджені палички. Стрілки електрометрів реагують по-різному. Отже, заряди є протилежними. У кінці досліду з'єднують обидві заряджених кулі мідним дротом на ізолюючої ручці. Відбувається нейтралізація заряджених куль.



3.6. Розподіл зарядів і потенціалу на поверхні і всередині зарядженого провідника

Прилади: укріплений на стійці циліндричний провідник з конусоподібними торцями: з одного кінця - у вигляді виступу, а з іншого - у вигляді заглиблення. Велика порожниста металева куля на ізолюючій підставці. Електрофорна машина. Електрометр. Пробна металева кулька на ізолюючій ручці. Скляна паличка і клапоть гуми. Пластмасова паличка і шматок бавовняної тканини.

Досліди 1.А і 1.Б. Розподіл зарядів. Рис.1

1. А.

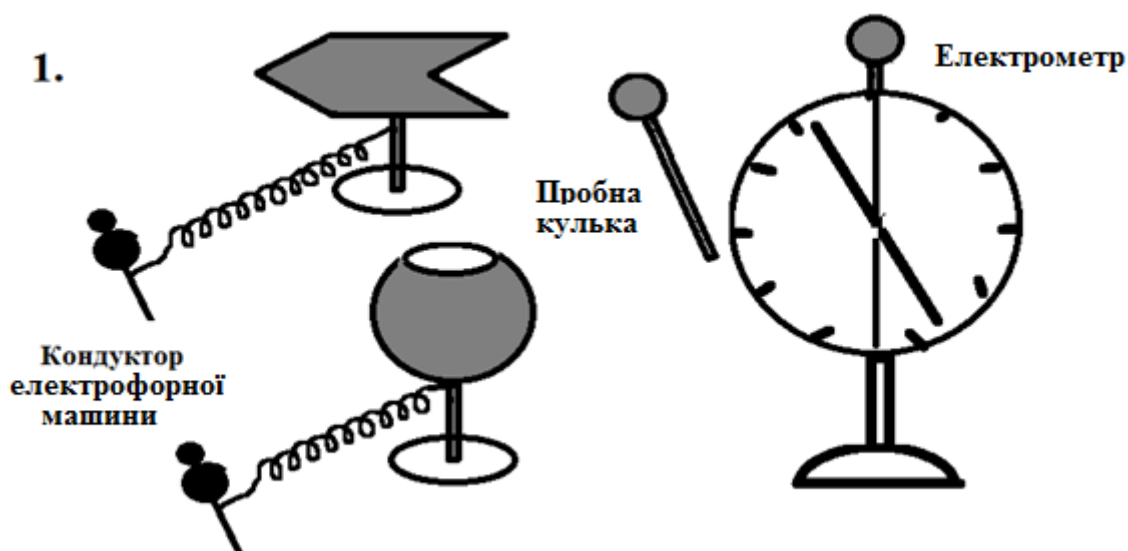


Рис. 1

Заряджають від електрофорної машини велику порожнисту металеву кулю на ізолюючій підставці. Пробну кульку на ебонітовій ручці вставляють в отвір зверху порожнистої кулі, торкаються зсередини, водять по внутрішній поверхні, «збираючи» нібито заряд (ми знаємо, що його там немає!). «Зібраний» заряд переносять на кульку електрометра. Електрометр нічого не показує.

Тією ж пробною кулькою водять по зовнішній поверхні порожнистої зарядженої кулі. Переносять зібрану електрику на електрометр. Тепер стрілка електрометра відхиляється.

Пояснення досліду: заряд розподіляється на зовнішній поверхні провідника; всередині провідника вільних зарядів немає.

1. Б. Аналогічно заряджають циліндричний провідник з гострим виступом і западиною. Пробною кулькою знімають заряд, торкаючись по черзі до поверхні провідника в різних місцях - на плоскій частині, на вістрі виступу, на угнутих частинах. Кожен раз заряд переноситься для порівняння на електрометр, який в кожному випадку попередньо звільняється від попереднього заряду торканням долоні.

Пояснення досліду. Густина електричних зарядів на поверхні провідника є різною - на опуклих поверхнях вона є більшою, на увігнутих - меншою. Це пояснюється тим, що електричні заряди в провіднику, завдяки кулонівському відштовхуванню, прагнуть розміститися на максимально далекій відстані один від одного. Тому в стані рівноваги на виступаючому вістрі конуса зарядів значно більше, ніж на бічній поверхні, і тим більше, на увігнутій всередину торцевій поверхні.

Рекомендація. Оскільки заряди поступово стікають з заряджених провідників, незважаючи на ізолюючі підставки, можна ці провідники підзаряджати від електрофорної машини. Провідник з'єднується з одним із кондукторів (будь-яким) електрофорної машини. Один демонстратор (наприклад, лектор) повільно обертає ручку електрофорної машини, надаючи провіднику заряд і компенсуючи спад заряду внаслідок стікання зарядів, інший сканує поверхню провідника.

Дослід 2. Розподіл потенціалу. Рис.2.

Тепер пробну кульку з'єднують довгим тонким спіральним провідником з електрометром. Торкаються кулькою до поверхні зарядженої кулі. Стрілка приладу відхилиться на деякий кут. Не відриваючи кульки від поверхні кулі, проводять нею уздовж всієї поверхні. Потім торкаються кулькою до будь-якої точки циліндричного провідника, проводять нею уздовж всієї поверхні від виступаючої частини до вгнутої частини. Показання електрометра в обох випадках не змінюються.

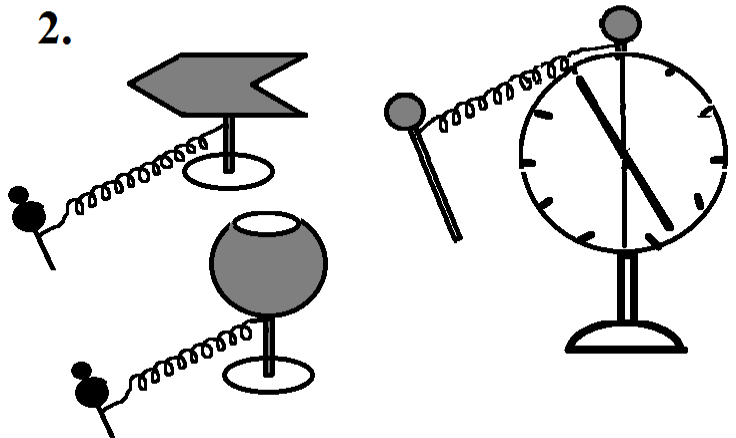


Рис.2.

Пояснення досліду. Відхилення стрілки електрометра залежить від заряду, а заряд, в свою чергу, від потенціалу даної точки тіла. Поверхня провідника є екіпотенціальною.

3.7. Вимірювання потенціалу електричного поля в повітрі за допомогою полум'яного зонда

Прилади: укріплені на одному штативі провідник у формі конуса і полум'яний зонд, електрометр, гнучкі проводи, наелектризована паличка.

Мета досліду. Різницю потенціалів між двома провідниками 1 і 2 можна виміряти за допомогою електрометра. Для цього один провідник з'єднують зі стрижнем (кулькою) електрометра, інший - з його оболонкою (корпусом). Стрілка електрометра при цьому набуде потенціалу тіла 1, а оболонка - потенціалу тіла 2.

В якості другого тіла зазвичай використовують Землю, тобто оболонку електрометра заземлюють. В такому випадку електрометрії покаже потенціал тіла 1 відносно Землі.

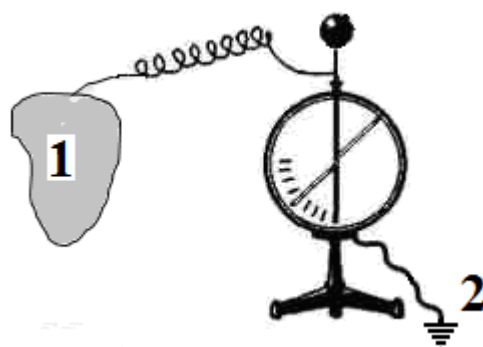
Для вимірювання потенціалу в будь-якій точці електричного поля в повітрі користуються зондом.

Зонд являє собою кінчик металеві дротинки (вістря), який з'єднаний провідником зі стрижнем електрометра.

Однак, на зонді, вміщеному в електричне поле, з'являються індуковані заряди. Це змінює потенціал у вимірюваній точці простору.

Тому для того, щоб була можливість істинного вимірювання потенціалу треба, щоб при внесенні зонда в досліджувану точку зонд і з'єднана з ним кулька електроскопа набули потенціалу, який був в даній точці до внесення зонда. Цього можна досягти, якщо прибрати індуковані заряди з зонда.

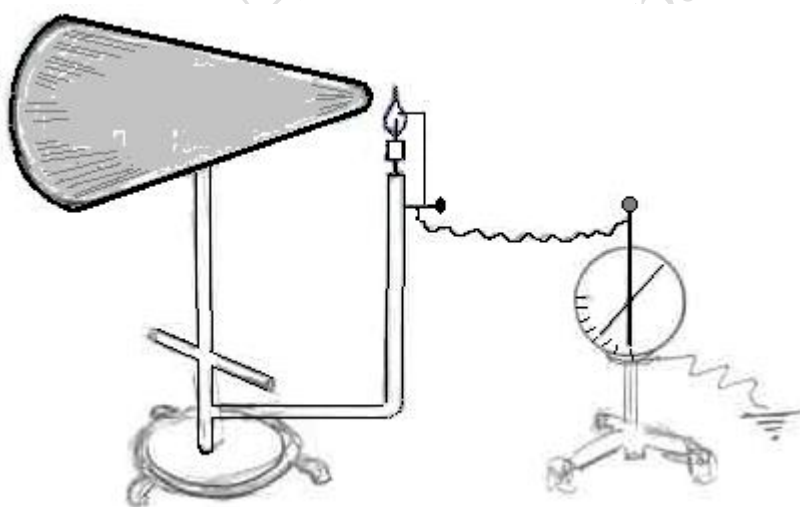
Видалення індукованих зарядів можна здійснити за допомогою полум'яного зонда. Кінчик дротинки поміщають в полум'я пальника. Завдяки високій температурі полум'я навколишнє повітря іонізується. Утворені іони знімають індуковані заряди з зонда і відносяться потоком навколишнього газу.



Дослід. Заряджають наелектризованою паличкою металевий конусоподібний провідник і підносять до нього на відстань 5 - 7 см зонд (див. рис.).

Стрілка відхиляється, електрометр показує різницю потенціалів між вістрям, що міститься в даній точці поля, і землею. Повертаючи за ручку конусоподібний провідник навколо вертикальної осі на 180° , вимірюють потенціали на однаковій відстані від гострого і тупого кінця металевого зарядженого конуса. Спостерігають більші чи менші показники електрометра.

Пояснення досліду. Поблизу гострого кінця зарядженого провідника напруженість електричного поля є більшою, тому що більшою є поверхнева густина



зарядів. Відповідно у цього кінця більшою є градієнт потенціалу. Тому на однаковій відстані від провідника зонд потрапляє у тупого кінця на близьку екіпотенціальну поверхню, тут потенціал поля більший, а у гострого кінця - на далеку.

3.8. Реактивні сили, що виникають під час стікання зарядів із металевих вістер. Колесо Франкліна

Прилади: легка S- подібна металева вертушка з гострими кінцями, яка спи-рається на голчастий підшипник підставки. Електрофорна машина. Демонстраційний столик.

Дослід. Колесо Франкліна поміщають на демонстраційний столик, щоб краще було видно аудиторії. Заряджають вертушку від кондуктора електрофорної машини і спостерігають обертання за рахунок реактивних сил від двох вістер.

Пояснення досліду. Поблизу вістря густина зарядів може бути настільки великою, що молекули повітря поблизу вістря іонізуються (ударом).

Потім ці молекули захоплюються полем вістря і утворюють «електричний вітер», спрямований від вістря. S - подібна вертушка стоїть на вістрі вертикальної підставки і може обертатися.

Дослід був запропонований американським дослідником природи Бенджаміном Франкліном (1706-1790), який згодом став президентом США. Його портрет поміщений на стодоларовій купюрі.



3.9. Екрануюча дія провідників. Клітка Фарадея

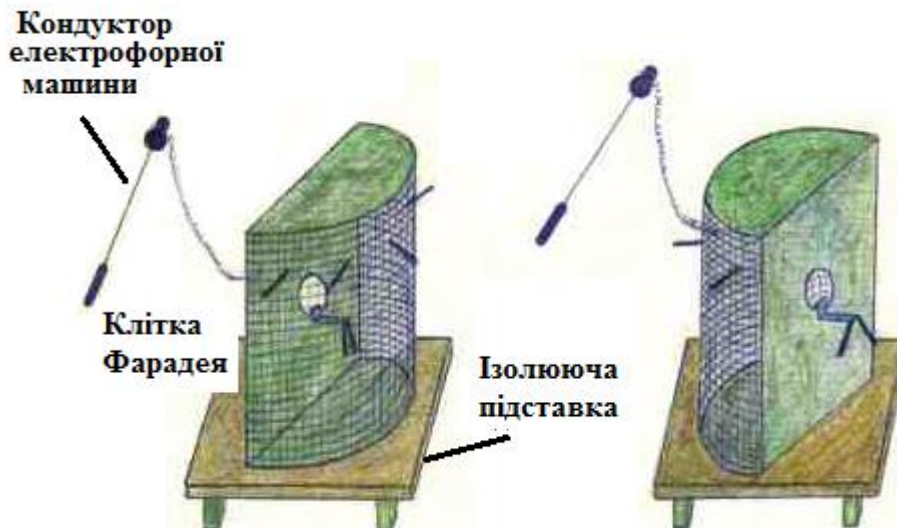
Прилади: захисна металева оболонка циліндричної форми - клітка Фарадея, що утворює замкнуту поверхню. Дерев'яна підставка на чотирьох скляних ніжках - ізоляторах. Електрофорна машина.

Дослід. Клітка Фарадея - пристрій, винайдений знаменитим англійським фізиком Майклом Фарадеєм в 1836 році для екранування апаратури від зовнішніх електромагнітних полів.

До клітки Фарадея, виготовленої з дрібної латунної сітки (в досліді пофарбована), з двох сторін - зовнішньої і внутрішньої - прикріплені паперові пелюстки, які відіграють роль електроскопів.

З'єднують клітку з будь-яким кондуктором електрофорної машини і повільно обертають диски машини. Листочки - електроскопи - відхиляються тільки на зовнішній поверхні зарядженої сітки. Паперові прапорці електроскопів зовні розходяться. Якщо прапорець один, він стає перпендикулярно до сітки. У середині клітки прапорці-індикатори висять нерухомо. Щоб не було сумнівів з приводу внутрішнього індикатора, його можна перевісити так, щоб прапорці висіли зовні. Знову заряджають клітку. Пелюстки перевішеного назовні індикатора тепер розходяться (див. рис.).

По-
досліду.
ного поля
провідни-
рівноваги
поле на
перпенди-
до цієї по-



яснення
Електрич-
всередині
ка в стані
немає. А
поверхні є
кулярним
верхні.

Проведені досліди демонструють дію електростатичного захисту – поміщення приладів, чутливих до електричного поля, всередину замкнутої провідної оболонки для екранування від зовнішнього електричного поля.

3.10. Розсувний конденсатор. Залежність напруги на конденсаторі від відстані між пластинами і діелектричної проникності діелектрика

Прилади: дві пластини конденсатора, укріплені на підставці, пластина скла, яка може заповнювати проміжок між обкладинками. Одна пластина конденсатора закріплена нерухомо, друга може переміщатися за допомогою гвинта. Одна з пластин обладнана електроскопом - паперовим пелюстком, що висить на стійці цієї пластини. Другу пластину бажано при цьому заземлити.

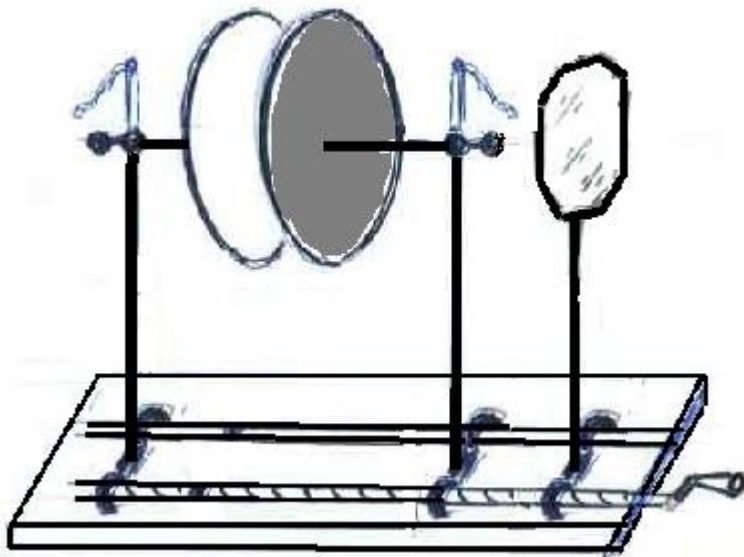
Дослід.

1) Нерухому пластину конденсатора заряджають від наелектризованої пластмасової палички (можна і скляної). Прапорець електроскопа відходить на деякий кут і реєструє потенціал пластини. Обертаючи ручку приладу, відсуваємо гвинтом рухливу пластину. При цьому прапорець відхиляється на більший кут.

2) Рухому пластину конденсатора встановлюють від нерухомої пластини на відстані трохи більшій, ніж товщина скляної пластини, що додається до приладу. Заряджають нерухому пластину конденсатора. Стрілка електроскопа відхилиться на деякий кут. Вводять між обкладинками конденсатора скляну пластину. Відхилення стрілки електроскопа зменшиться. Видаляють діелектричну пластину з конденсатора. Стрілка електроскопа повертається в початкове положення.

Пояснення досліду. При перенесенні заряду q на одну з обкладинок конденсатора між його обкладинками встановлюється різниця потенціалів $\Delta\varphi = q/C$, де C - електроємність конденсатора. **Електроскоп реєструє цю різницю потенціалів.**

лів. Електроємність плоского конденсатора визначається формулою: $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$, де S



- площа пластин конденсатора; d - відстань між пластинами;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф / м}$ - електрична стала, ε - відносна діелектрична проникність діелектричної пластини. Таким чином, різниця потенціалів на обкладинках конденсатора в даному експерименті визначається формулою:

$$\Delta\varphi = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0 S}.$$

1) Збільшення відстані d між обкладинками конденса-

тора при незмінному заряді q призводить до збільшення різниці потенціалів між ними. Відхилення стрілки електроскопа збільшується.

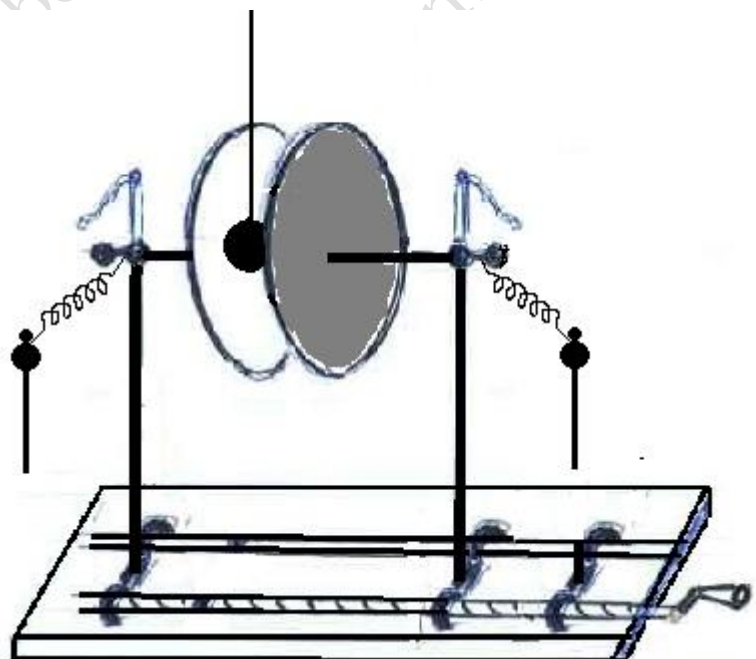
2) Введення діелектричної пластини між обкладинками конденсатора призводить до зменшення різниці потенціалів між ними. Відхилення стрілки електроскопа зменшується, так як для діелектрика $\varepsilon > 1$, а для повітря $\varepsilon = 1$.

Рекомендація. Щоб не було витоку зарядів, прилади перед дослідом необхідно просушити.

3.11. Робота електричних сил

Прилади. Розсувний плоский конденсатор. Електрофорна машина. Легка станіолева кулька, підвішена на тонкій ізолюючій нитці на штативі між пластинами конденсатора

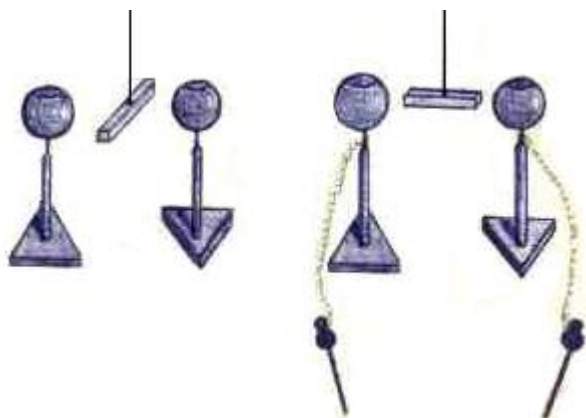
Дослід. З'єднують кожну пластину розсувного конденсатора з відповідним кондуктором (електродом) електрофорної машини. Заряджають пластини, повільно і безперервно обертаючи ручку машини. При такому способі зарядження компенсується неминуче стікання зарядів з пластин. Кулька починає дуже швидко коливатися між пластинами, відскакуючи і переносячи заряд від пластини до пластини. При



цьому кулька видає дробовий звук при ударах. Відстань між пластинами близько 10 см. Довжина нитки підвісу близько 1 м.

3.12. Поляризація діелектрика (паличка плексигласу)

Прилади. Дві порожнистих металевих кулі на ізолюючих підставках, між якими на високому штативі підвішується паличка діелектрика (плексигласу), яка може обертатися на капроновій нитці підвісу. Електрофорна машина, з полюсами якої з'єднана кожна з металевих куль.



Дослід. Паличку плексигласу встановлюють перпендикулярно полю і, повільно обертаючи диски електрофорної машини, починають заряджати кулі. Коли кулі досить зарядяться, в створеному ними полі відбудеться поляризація підвішеної палички, вона повернеться уздовж поля.

Знімають заряди, закорочуючи контакти електрофорної машини, - паличка повертається у вихідне положення перпендикулярно полю.

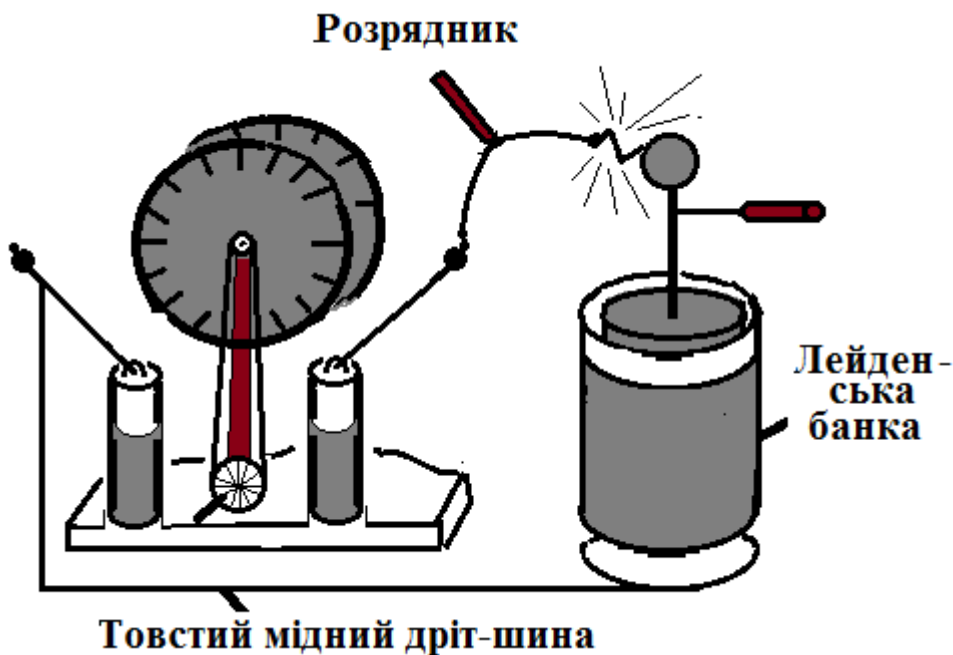
3.13. Поляризація краю дерев'яної планки

Дослід. Велика дерев'яна планка підвішена за середину і врівноважена на стійці поруч з лекційною дошкою. Можна її розгойдати, поляризуючи край планки. Не торкаючись, підносять до планки скляну паличку, потерту гумовою пластикою.

За рахунок виникнення поляризаційних зарядів скляна паличка притягує дерев'яну планку. Повторюють кілька разів, поки притягання не стане очевидним, і планка не почне розгойдуватися.

3.14. Розбірна лейденська банка. Електрети

Лейденська банка - одна з найбільш небезпечних речей, яку використовують в електротехніці. Розряд такого конденсатора може бути смертельним. Будьте обережні, ніколи не беріться за лейденські банки двома руками!



Пристрій.

Лейденська банка (по суті - розбірний циліндричний конденсатор) складається з 3-х частин:

1. Зовнішній циліндр порожнистий цинковий;
2. Циліндр порожнистий з діелектрика, вставляється в зовнішній;
3. Внутрішній циліндр порожнистий

тий цинковий закритої форми, з центральним стержнем-розрядником, на кінці якого міститься кулька розрядника. Вставляється в діелектричний циліндр. Внутрішній циліндр забезпечений ізолюючою ручкою, яка використовується при розбиранні зарядженої банки.

Дослід. На очах аудиторії з трьох циліндрів, що стоять на столі, збирають попередньо перевірену (розряджену про всяк випадок розрядником) лейденську банку. Вставляють діелектрик в зовнішній циліндр, останнім вставляють внутрішній циліндр. За всі три частини можна братися руками (якщо до цього вони довго лежали в демонстраційній аудиторії).

Зарядження лейденської банки. З одним кондуктором (електродом) електрофорної машини з'єднують спеціальний товстий мідний дріт-шину без ізоляції, що закінчується петлею. Шина згинається в декількох місцях і прокладається поруч з підставкою електрофорної машини, так, щоб кінець шини - петля – розміщувалася на столі на деякій відстані від машини. На цю петлю ставлять денцем зібрану лейденську банку.



До кульки другого кондуктора електрофорної машини щільно притискають один кінець спеціального розрядника, оснащеного ізолюючою ручкою. Інший кінець цього розрядника підносять до центральної кульки лейденської банки на відстань приблизно 2-5 мм, але не торкаються його. Під час роботи електрофорної машини між другим кінцем розрядника і кулькою лейденської банки починають проскакувати іскри. Спочатку, коли лейденська банка ще не заряджена, вона добре «бере заряд», іскри звучать як безперерв-

ний тріск і є досить великими. Потім, у міру зарядки лейденської банки іскри стають дрібнішими і дрібнішими, розрядник слід поступово наближати до центрального кульки лейденської банки аж до торкання в кінці заряду. Зарядка триває приблизно 20 секунд.

Припиняють зарядку, прибираючи розрядник.

1. Тим же розрядником на ізолюючій ручці торкаються одним кінцем до зовнішньої бокової металевої поверхні банки і обережно підносять другий кінець розрядника до центрального кульки банки. При зближенні лунає гучний розряд.

2. Закорочують далі розрядником зовнішній циліндр та внутрішній наглухо - банка при цьому повністю розряджається.

3. Знову заряджають лейденську банку. Заряджену банку цього разу не розряджають.

4. Розбирають **заряджену** лейденську банку. Не торкаючись рукою внутрішнього циліндра (інакше **можна отримати сильний електричний удар !!!**) ізолюючої рукояткою виймають внутрішній циліндр і ставлять на стіл. Потім беруться руками за зовнішній циліндр і знімають його з діелектричного. Ці два циліндри теж ставлять на стіл. Призводять до торкання металеві циліндри. Вставляють внутрішній циліндр в зовнішній без діелектрика. За обидва циліндри можна братися руками. У тому, що заряду на цих циліндрах немає, переконують аудиторію, доторкнувшись кожним циліндром до кульки електрометра. Електрометр мовчить.

5. На столі лежать три складові частини лейденської банки.

Збирають потім обережно з лежачих на столі частин лейденську банку. Спочатку руками вставляють діелектрик в зовнішній циліндр. Потім **беруть за ізолюючу ручку (!!!)** внутрішній циліндр і вставляють його. До зовнішнього торкатися при цьому **не можна !!!**

Банку більше руками не чіпають. Торкаються розрядником до зовнішньої частини і центральної кульки. **Знову стріляє розряд**, банка дає хорошу іскру!

Здивування. Адже банка була розібрана, і заряду не було.

Пояснення досліду. Між циліндрами лейденської банки міститься спеціальний діелектрик, який зберігає протягом декількох хвилин поляризованість (т.зв. електрет). Тому при складанні банки на її металевих частинах індукується заряд.

3.15. П'єзоефект (прямий)

Прилади: п'єзоелементи (кристал титанату барію з прикріпленими до нього контактними металевими пластинами і більш чутливий пьезодатчик), дерев'яний молоточок, осцилограф. Збирають схему, показану на рисунку.

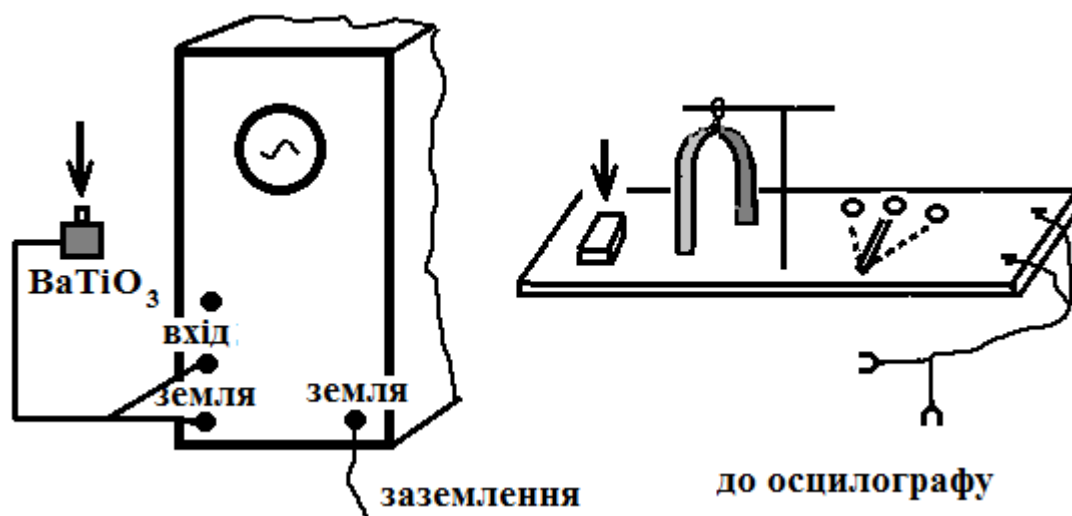
Дослід. По контактній пластині кристалика титанату барію легко (!) вдаряють дерев'яним молоточком. На екрані осцилографа від виниклого електричного сигналу з'являється сплеск.

Потім демонструють більш чутливий пьезодатчик. Спочатку проводять пальцем по подушечках, в яких затиснутий пьезодатчик. На екрані осцилографа видно шуми - нерегулярні електричні сигнали. Потім переключають схему на пьезодатчик, укріплений на ніжці камертона. Якщо тихенько вдарити молоточком по

ніжці камертона, ніжка прийде в коливання, камертон видає слабкий гармонічний звук. П'єзодатчик тепер деформується по гармонічному закону - на екрані осцилографа з'являється синусоїда.

Пояснення досліду. Іонні кристали (кварц, турмалін, цинкова обманка, хлорат натрію, сегнетова сіль, титанат барію та ін.) побудовані з кристалічних ґраток позитивних і негативних іонів. Під дією зовнішніх сил ці ґратки деформуються по-різному і на протилежних поверхнях кристалу виступають електричні заряди різних знаків. Це і є прямий п'єзоефект. Дослід ілюструє явище виникнення електричного заряду на поверхні кристала при його стисканні

Пластинки зі штучно вирощених кристалів служать основним робочим елементом п'єзодатчиків і п'єзомікрофонів.



Установчі дані на осцилографі.

Ослаблення 1:10.

Підсилення по X 2.

Підсилення по Y ... 7.

Амплітуда синхронізації 4.

Частота плавно ... 7.

Діапазон частот ... 7.

Синхронізація від мережі.

Електричний струм

3.16. Очищення газів. Електричний фільтр

Прилади: скляна посудина, що має форму акваріума, з двома електродами-щітками. Електрофорна машина. Сигарета. Сірники.

Дослід. Коронний розряд можна спостерігати при атмосферному тиску в сильно неоднорідному електричному полі. Таке поле можна створити між двома дротяними електродами, що мають форму пучка дротів, що стирчать в різні боки.

З'єднують електроди пристрою з кондукторами електрофорної машини. В об'єм камери, прикритий склом, напускають диму. Для цього, злегка відсувають

куточок скла і вставляють туди джерело диму. Струмінь диму добре виходить, якщо прикурити сигарету, відірвати фільтр і взяти її палаючою стороною в рот, вдуги в акваріум дим. Потрібне тренування, можна обпектиса !! Для цих цілей зручні були раніше цигарки.

Засовують скло, закриваючи судину, і обертають електрофорну машину. Дим швидко розсіюється у вигляді вихорів.

Коронний розряд використовують в електричних фільтрах для очищення газів. Іони газового розряду осідають на частинках диму. Тому частинки диму рухаються під дією електричного поля і осідають на електродах.

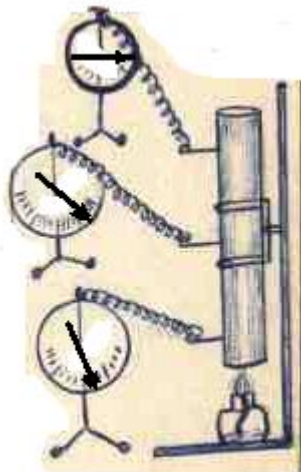
В кінці досліду лектор показує щітки, на яких осіли частинки диму, мацає їх пальцями і розказує про шкоду куріння.



3.17. Іонізація повітря і рекомбінація іонів

Прилади: вертикальна бляшана труба діаметром 6 см з трьома виводами (зондами). Кожен зонд ізольований від труби спеціальними втулками. У середині труби зонд являє собою товстий мідний дріт, вигнутий під прямим кутом по осі труби. Другі кінці цього дроту з'єднуються з електрометрами.

Дослід. На початку досліду всі три електрометри **однаково заряджають** скляною (або ебонітовою) паличкою. Потім ставлять палаючу спиртівку під трубу. В ході експерименту електрометри розряджаються і показують різний заряд. Нижній електрометр розряджається найсильніше. Верхній - менше за всіх.



Пояснення досліду. У полум'ї пальника утворюються іони обох знаків. У міру підняття догори зі струмом гарячого повітря частина іонів рекомбінує.

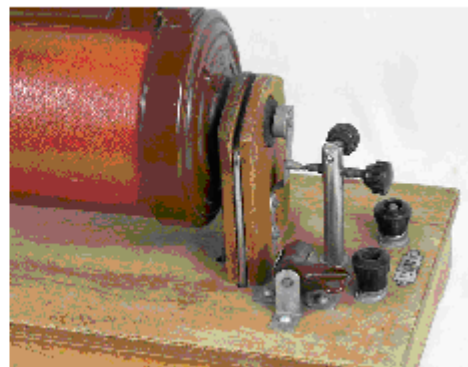
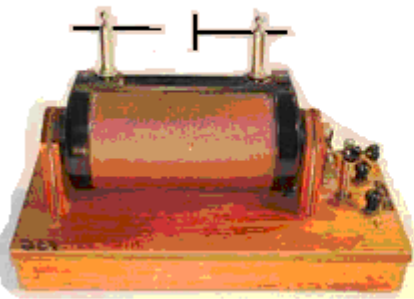
Оскільки до верхнього електрометра доходить повітря, що значною мірою складається з нейтральних молекул (іони на шляху вгору встигли рекомбінувати), то такий газ не розряджає електрометра.

3.18. Котушка Румкорфа (високовольтний індуктор). Іскровий розряд в повітрі

Дослід. Демонстрація електричних розрядів в повітрі за нормальних умов - іскрового розряду між верхніми електродами (диск і вістря).

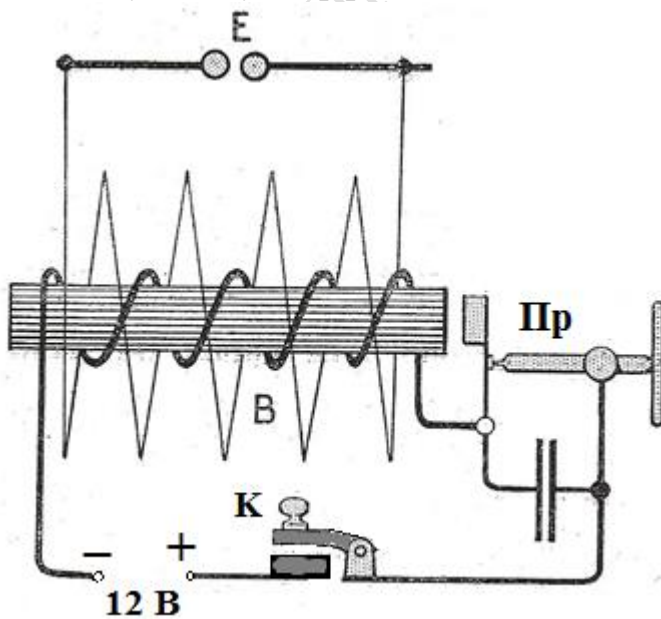
Котушка підключається до джерела живлення постійного струму (розетка «= 50 В» на демонстраційному столі), наприклад, через малий рубильник (ключ) К. З огляду на те, що на самій котушці теж є вимикач, можна вилучити рубильник. На розетку подають від випрямляча КЕФ -8 (в демонстраційній аудиторії 2/33) 12 В.

Верхні розрядники котушки при вимкненій напрузі розводять приблизно на 3-5 см. Потім включають котушку і спостерігають іскровий розряд. Дослід краще проводити в затіненій аудиторії. При правильному включенні котушки на вістрі повинен бути «плюс» і іскра б'є в цент диска. При «мінусі» на вістрі іскра б'є в край диска.



Конструкція і схема підключення

Котушка Румкорфа складається з двох обмоток з ізолюваного мідного дроту навколо загального залізного осердя (В).



Первинна обмотка містить відносно малу кількість (десятки, сотні) витків товстого дроту. Вторинна обмотка містить велику кількість (тисячі) витків тонкого дроту. До складу котушки входить автоматичний переривник (Пр) кола первинної обмотки (вібратор), конденсатор, а також регульований розрядний проміжок (Е) в колі вторинної обмотки. Молоточковий переривник призначений для швидкого попереминого розмикання і замикання електричного кола. Зазор між якорем переривника і осердям котушки може регулюватися гвинтом.

Принцип дії.

При замиканні ключем K кола джерела живлення з первинної обмоткою в ній проходить зростаючий струм. Зростання обумовлено індуктивним характером кола. У магнітному полі котушки накопичується енергія.

Коли магнітний потік в осерді досягає певної величини, якір переривника притягається до сердечника, і електричне коло розмикається.

Розмикання електричного кола призводить до різкого зменшення струму первинної обмотки і до зменшення магнітного потоку. Якір переривника під дією пружини повертається у вихідне положення, і електричне коло замикається. Магнітний потік в осерді знову досягає певної величини, і електричне коло розмикається. Процес розмикання-замикання триває безперервно до тих пір, поки замкнений ключ K .

Напруга на вторинній обмотці (вторинна напруга,) приблизно пропорційна швидкості зміни струму в первинній обмотці (первинного струму,). При розмиканні і замиканні переривника напруга на вторинній обмотці має різну полярність. При замиканні струм зростає (збільшується) порівняно повільно, причому швидкість зростання струму поступово зменшується через активний опір кола первинної обмотки і внутрішній опір джерела живлення. При розмиканні зміна струму в первинній обмотці є більш різкою. Тому імпульсна напруга на вторинній обмотці під час розмикання є набагато більшою, ніж при замиканні.

Таким чином, в кожному інтервалі розриву кола переривника, за допомогою електромагнітної індукції на вторинній обмотці наводяться імпульси високої напруги (десятки, сотні тисяч вольт). Кожен імпульс, що має достатню амплітуду, викликає іскровий розряд в розрядному проміжку.

Призначення конденсатора.

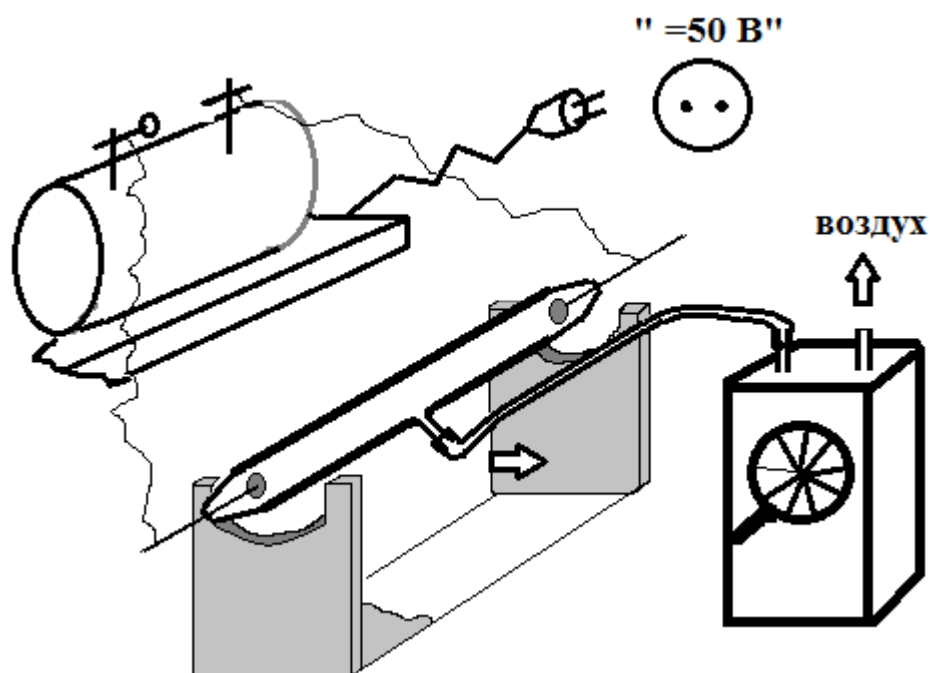
При відсутності конденсатора розмикання переривника супроводжується появою між його контактами значною ЕРС самоіндукції. Це призводить до іонізації повітряного зазору між контактами і *утворення електричної дуги*, в якій витрачається енергія, запасена в котушці. При цьому швидкість зміни (спаду) первинного струму сповільнюється, і вихідна напруга зменшується.

При наявності конденсатора (ємністю приблизно від 0,5 до 15 мкФ) електрична напруга між контактами переривника в момент розмикання виявляється рівною напрузі на конденсаторі, тобто близькою до нуля. Тому електрична дуга не утворюється, і швидкість зміни первинного струму при розмиканні переривника значно зростає. Відповідно зростає і наведена напруга на вторинній обмотці. Конденсатор і первинна обмотка в інтервалі часу розриву утворюють коливальний контур, тому в первинній обмотці проходить осцилювальний загасаючий синусоїдальний струм, внаслідок чого наводиться синусоїдальна напруга на вторинній обмотці.

Наявність конденсатора усуває втрати енергії при розмиканні контактів переривника, однак при відносно великій частоті роботи переривника втрати можуть з'являтися при замиканні контактів - якщо воно відбувається в момент, коли напруга на конденсаторі значно відрізняється від нульової.

3. 19. Спостереження тліючого розряду з евакуацією повітря

Прилади: двохелектродна скляна трубка, з якої можна відкачувати повітря, котушка Румкорфа (високовольтний індуктор), ручний насос для відкачування (насос Комовського).



Дослід. У демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 встановлюється напруга від 10 до 12 В. Котушка Румкорфа включається шнуром з вилкою в розетку з написом «= 50 В» на демонстраційному столі. Включення і вимикання котушки Румкорфа здійснюється вимикачем, розміщеним на ній. Дослід проводять в затіненій аудиторії.

Розрядники котушки Румкорфа з'єднують м'якими крученими провідниками з електродами на скляній трубці. Ручним насосом починають видавувати повітря з трубки. Після десятка качань включають котушку Румкорфа і продовжують відкачувати повітря.

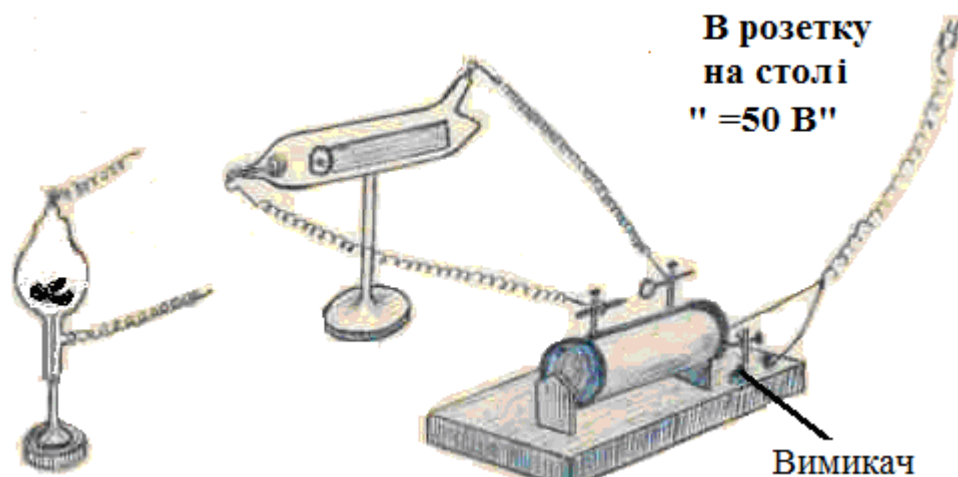
У початковий момент розряду в трубці не відбувається. У міру відкачування повітря з трубки в ній виникає світіння. Спочатку розряд має форму тонких світних ниток, що перебігають, потім шнура малинового кольору, що з'єднує обидва електроди. При подальшому зниженні тиску світний шнур блідне, розширюється, займає всю трубку. (Все описане далі не спостерігається - для цього потрібен хороший форвакуумний насос. Далі має відбуватися утворення помітного темного катодного простору і позитивного анодного стовпа, а потім утворення окремих шарів - страт).

Пояснення досліду. Розряд в трубці виникає внаслідок того, що в розряженому повітрі збільшується довжина вільного пробігу електронів. Розганяючись, електрони набувають енергії, достатньої для іонізації нейтральних молекул. Джерелом електронів є катод, який бомбардується позитивними іонами. Ці іони і вибивають з катода електрони (вторинна електронна емісія).

3.20. Катодні трубки (трубки Крукса)

Прилади: котушка Румкорфа, скляні трубки Крукса різної форми, магніт.

Дослід. У демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 встановлюється напруга від 10 до 12 В. Котушка Румкорфа включається шнуром з вилкою в розетку з написом «= 50 В» на демонстраційному столі. Включення і вимикання котушки



Румкорфа здійснюється вимикачем, розміщеним на ній.

Розрядники котушки Румкорфа з'єднують м'якими крученими провідниками з електродами на трубках Крукса. Включають котушку і спостерігають світіння в трубках. Дослід краще проводити в напівтемній аудиторії.

Пояснення досліду. Під час тліючого розряду з катода вилітає велика кількість електронів, які вибиваються позитивними іонами. Електрони прискорюються в області катодного падіння потенціалу (див., наприклад, [1] т. 2. §7.5).

За тиску повітря $1,33 - 0,13$ Па електрони в трубці рухаються практично без зіткнень. Такі пучки вперше виявив англійський фізико-хімік У. Крукс. Електронна природа катодних променів підтверджується їх відхиленням в електричному і магнітному полях.

Катодні промені можуть викликати флюоресценцію твердих тіл. Поставлений по діагоналі скляної трубки екран, що флуоресціює, (покритий шаром сульфиду цинку) зі щілиною дозволяє отримати пучок електронів. Екран світиться в тих місцях, куди потрапляють електрони. На екрані, що флуоресціює, видно пряму смугу синюватого відтінку. Підносячи до трубки магніт, можна відхилити пучок електронів. З цією метою використовують підковоподібний сильний магніт, поворот якого на 180° змінює напрямок відхилення пучка.

Пучок електронів за рахунок власного тиску може також привести в рух дуже легке коліщатко з лопатями («млин Крукса»), яке також флуоресціює.

3.21. Вплив температури на опір металів і напівпровідників

Прилади: амперметр з прикріпленим до нього металевим провідником у вигляді спіралі. Гальванометр з нулем посередині. Напівпровідник (терморезистор). Спиртівка. З'єднувальні дроти.

Дослід. 1 - а частина досліду: Включають вилку в розетку з написом «= 50 В» на демонстраційному столі.

Змінюючи на випрямлячі КЕФ -8 (в демонстраційній аудиторії 2/33) напругу в межах 0 - 4 В, домагаються відхилення стрілки амперметра на декілька поділок (в межах від 5 до 10 А).

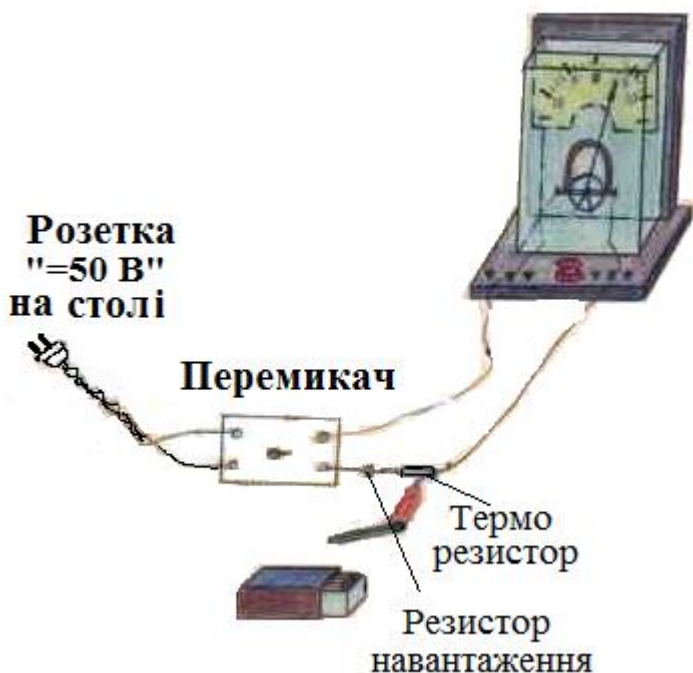
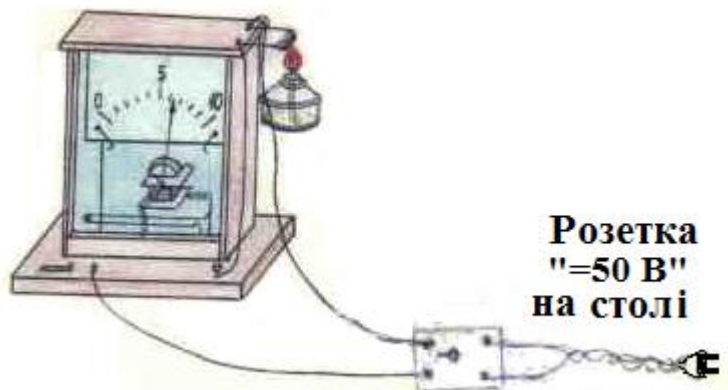
Підносять палаючу спиртівку (або палаючі таблетки сухого спирту) до спіралі. Слухачі бачать, що спіраль червоніє від нагрівання. Опір зростає, струм зменшується.

2 - а частина досліду. На випрямлячі КЕФ -8 встановлюють напругу ≈ 2 В, отримують невеликий струм і домагаються відхилення стрілки гальванометра (з нулем посередині) від нуля на кілька поділок. Нагріваючи напівпровідник палаючим сірником, демонструють збільшення струму.

Пояснення досліду. При нагріванні провідника концентрація вільних електронів в ньому не змінюється, але погіршуються умови прискорення їх в електричному полі. З ростом температури збільшується амплітуда коливань атомів решітки відносно положення рівноваги, що призводить до збільшення кількості зіткнень електронів з атомами, тобто до зменшення середньої швидкості їх направленої руху і, отже, до зростання питомого опору.

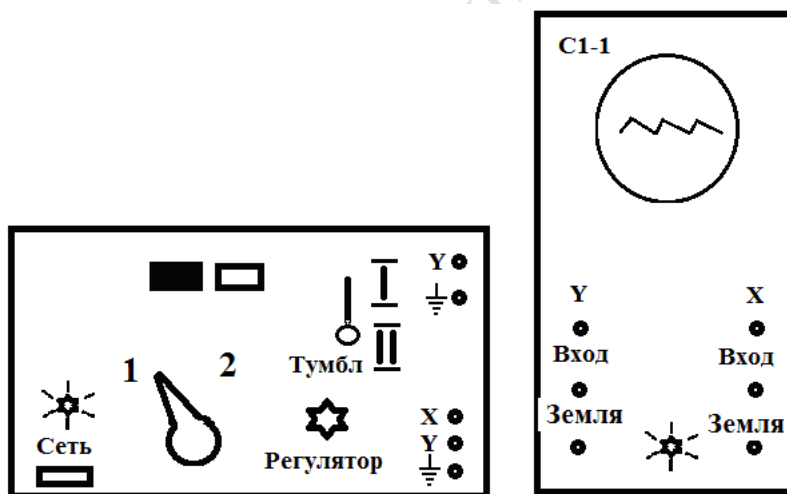
У разі напівпровідників зменшення їх електроопору пов'язане

зі різким зростанням концентрації вільних носіїв при збільшенні температури.



3.22. Напівпровідники. Випрямляюча дія р-п переходу

Прилади: спеціальний прилад (автор доцент А.С. Зайцев), осцилограф С1-1.



Ручки управління знаходяться в наступних положеннях.

На осцилографі С1-1:

Діапазон частот - 7.

Синхронізація - внутрішня.

Амплітуда синхронізації - 4.

Частота плавно - 7.

Ослаблення - 1: 100

Посилення: по X -3, по Y - 2.

Дослід: 1 частина. Випрямлення змінного струму.

Підключити прилад до мережі змінного струму (~ 220 В). З'єднати дві верхні клемми приладу (Y, земля) з відповідними клеммами осцилографа. Чорну і білу кнопки віджати. Тумблер і перемикач поставити в положення I На екрані осцилографа спостерігається однонапівперіодне випрямлення (рис. 1).

За допомогою фільтра, що згладжує, (перевести тумблер в положення II) можна отримати згладжені пульсації напруги на виході (рис. 2).

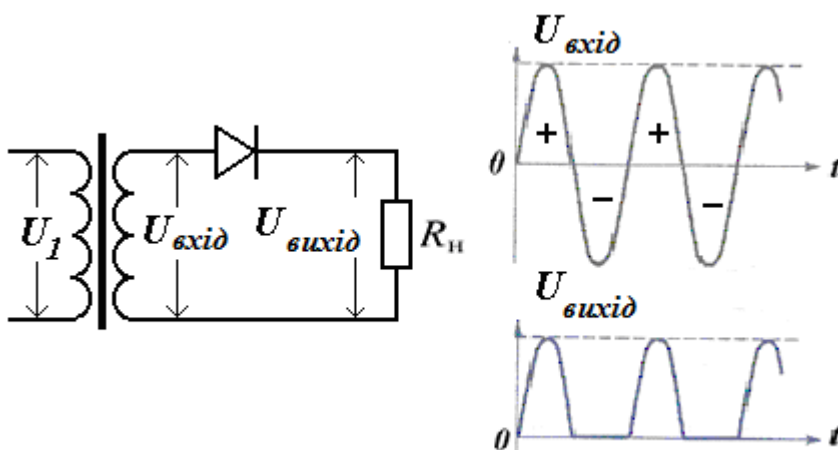


Рис. 1.

Натиснути білу кнопку, тумблер перевести в положення I. Це двохполуперіодне випрямлення без фільтра (рис. 3 $U_{\text{вих}}$ верхній малюнок). Перекласти тумблер в положення II отримаємо на

екрані результат фільтра, що згладжує (рис. 3 $U_{\text{вих}}$ нижній малюнок).

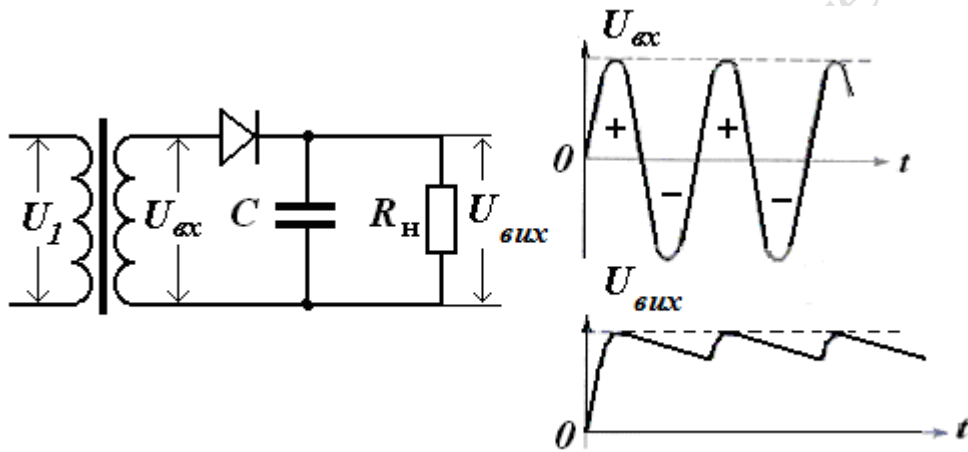


Рис. 2.

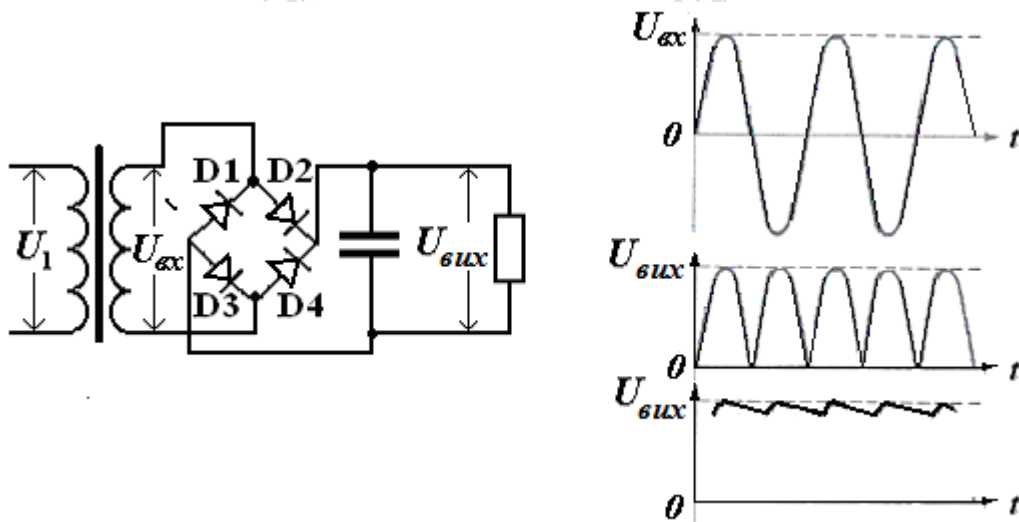


Рис. 3.

Дослід: 2 частина. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) діода.

Установчі дані. На осцилографі С1-1:

Діапазон частот - викл.

Синхронізація від мережі - викл.

Амплітуда синхронізації - 0.

Частота плавно - 0.

Ослаблення - 1: 100

Посилення: по X - 5, по Y - 8.

Приєднати нижні клеми X, Y, земля приладу до відповідних клем осцилографа. Чорну кнопку натиснути. Перемикач поставити в положення 1. Обертаючи регулятор, спостерігають на екрані осцилографа характеристики напівпровідникового діода (нелінійний опір, рис. 4).



Поставити перемикач в положення 2. На екрані спостерігається ВАХ лінійного опору - пряма лінія.

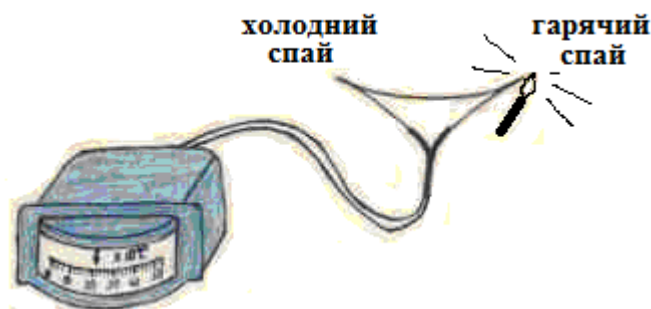
3.23. Термопара. Демонстрація промислової термопари з доменної печі



3.24. Термопара зі шкалою температур

Прилади. Промислова термопара зі шкалою в градусах Цельсія.

Дослід. Підігріваємо палаючим сірником один із спайв термопари і спостерігаємо відхилення покажчика на шкалі.

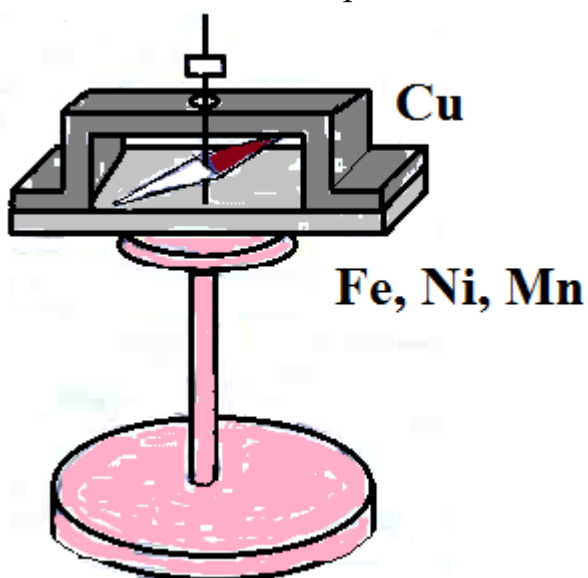


3.25. Явище Зеебека. Виникнення термоЕРС

Прилади: термопара з магнітною стрілкою і дзеркальцем (прилад Зеебека), ЛАТР, променевий освітлювач, демонстраційний столик, спиртівка, сірники.

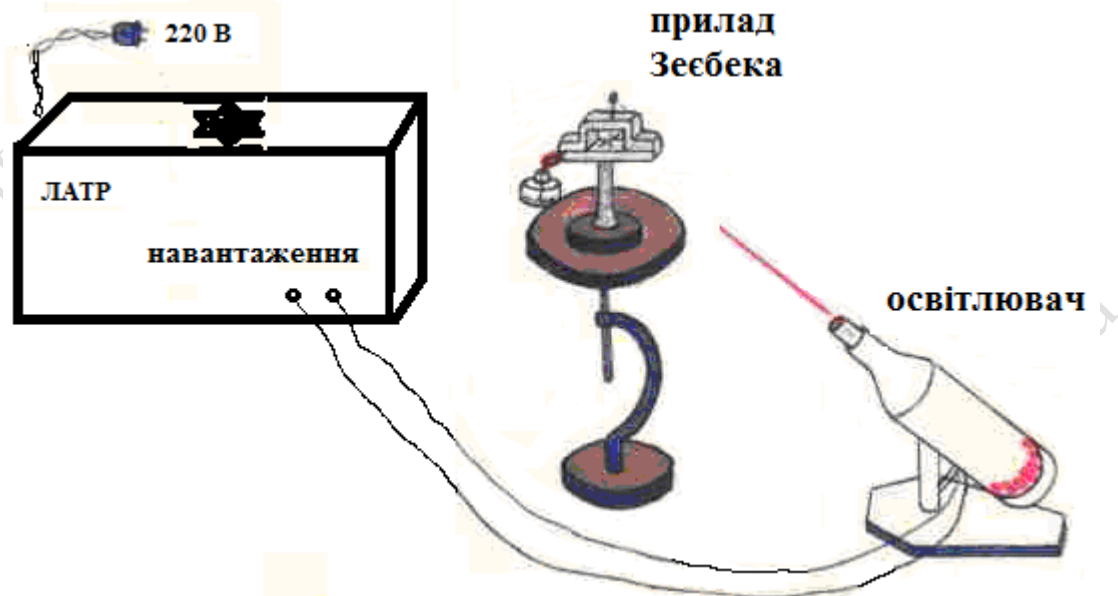
Прилад Зеебека: дві товстих (6 мм завтовшки) смужки - верхня мідна і нижня зі сплаву залізо - нікель - марганець - з'єднані послідовно і утворюють замкне-

не коло (див. рис.). У середині утвореного контуру на тонкій дротяній осі вільно підвішена магнітна стрілка. На цій же осі укріплено маленьке дзеркальце.



Дослід. Променевий ліхтар з'єднують з ЛАТРом. Направляють промінь на дзеркальце магнітної стрілки. Відбитий промінь спрямовують на середину великого екрану, на якому з'являється «зайчик».

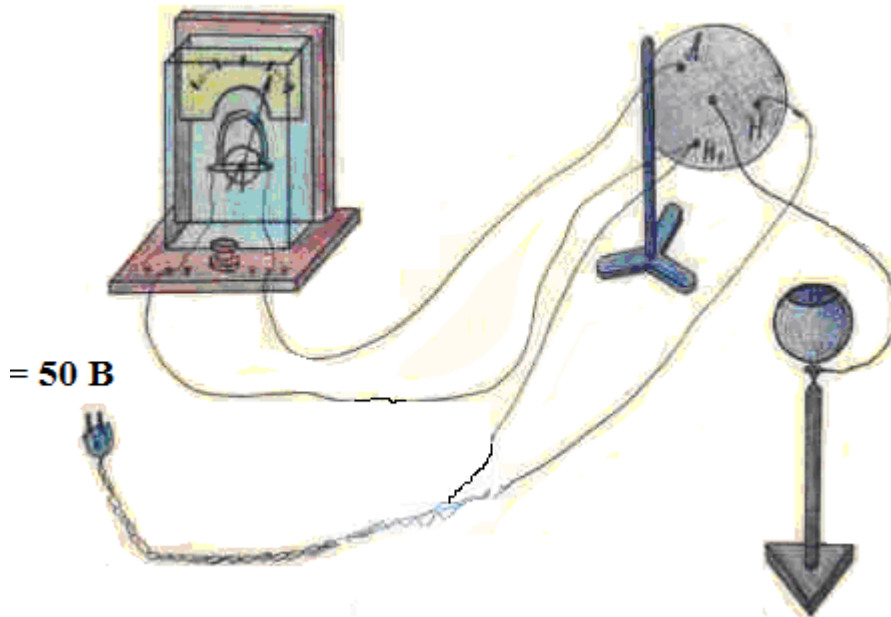
Спочатку нагрівають на спиртівці один спай термопари, стрілка повертається і «зайчик» переміщається в один бік. Потім підігрівають інший спай - «зайчик» переміщається в інший бік. Напруга на ліхтарі - освітлювачі - 8 В.



Пояснення досліду.

Явище Зеебека полягає в тому, що в замкнутому колі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, виникає термо-ЕРС, якщо місця контактів підтримують за різних температур. Коло, що складається тільки з двох різних провідників, називається термоелементом або термопарою. Оскільки кожен з провідників, що утворюють пару, тут спеціально виготовлений з товстої смужки, термострум, що виникає, є значним і може створити магнітне поле, що орієнтує магнітну стрілку.

3.26. Термоелектронна емісія. Робота електронної лампи-тріода



Прилади: ламповий тріод на демонстраційному щиті, укріпленому на штативі. Зі зворотного боку круглого щита відзначені значення виводів лампи-тріода. Порожниста металева куля на ізолюючій підставці, з'єднувальні дроти, амперметр. Скляна та пластмасових палички. Шматок гумового листа, шматок вовняної тканини.

Дослід. Ілюструє застосування термоелектронної емісії. Досліджується вплив сітки на анодний струм лампи-тріода.

Збирають схему згідно з рисунком. Коло підключають на демонстраційному столі до джерела живлення «= 50 В». Розжарення лампи підбирають на випрямлювачі КЕФ-8 поступово від нуля до 6 В, поки стрілка гальванометра не відхилиться на 4-5 поділок.

Підносять до кулі, але не торкаються, наелектризовану ебонітову (пластмасову) паличку. Сітка лампи через вплив заряджається негативно. Цим на керуючу сітку лампи подається «мінус», і лампа «закривається». Це призводить до зменшення анодного струму лампи до нуля.

Якщо тепер піднести до кулі позитивно заряджену скляну паличку, анодний струм різко зростає (на сітці плюс).

Примітка. 1. Якщо дії індукованого заряду кулі виявляється недостатньо, можна до кулі під'єднати один з полюсів електрофорної машини. Яким буде знак цього полюса - покаже поведінка анодного струму.

2. Лампові прилади більше не випускаються промисловістю, електроніка використовує напівпровідникові прилади.

Магнітне поле

3.27. Інклінатор і деклінатор. Магнітна стрілка в магнітному полі Землі

Прилад. (Нім.: *inklination* - «нахил», *deklination* - «схиляння» (магнітне)). На підставці укріплена кругла рамка. По діаметру рамки розміщене кріплення для магнітної стрілки.



Кріплення дозволяє встановлювати **вісь, на яку насаджена стрілка**, або вертикально, або горизонтально щодо поверхні Землі.

Дослід. Якщо вісь магнітної стрілки встановити вертикально, це буде стрілка компаса, що вказує напрямок Північ-Південь.

Якщо вісь магнітної стрілки встановити горизонтально, стрілка покаже кут нахилу до горизонту силових ліній магнітного поля Землі.

3.28. Магнітні силові лінії постійних магнітів

Між скляними поверхнями в кюветах розміщені прямі смугові постійні магніти і підковоподібний магніт. Вони по-різному орієнтовані один відносно іншого. Зверху на скло насипають дрібні залізні ошурки, ставлять на епідіаскоп «Полілюкс» і проєктують на великий екран. Злегка постукуючи олівцем по склу, щоб допомогти ошуркам вишикуватися, спостерігають картини магнітних полів.



3.29. Магнітне поле прямого струму. Дослід Ерстеда

Прилади: магнітна стрілка, дріт великого перерізу в ізоляції, пропущений через дві дерев'яні ручки, в одній з ручок - кнопка включення струму. Живлення приладу здійснюється від джерела постійної напруги (розетка «= 50 В» на демонстраційному столі).



Дослід. Демонстраційний дріт за допомогою вилки підключають в розетку, на якій написано «= 50 В». У демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 встановлюють 8 В, що відповідає силі струму 2 - 3 А. Ставлять на стіл магнітну стрілку на підставці і надають стрілці можливості повністю заспокоїтися. Над стрілкою паралельно до неї розміщують дріт, обладнаний двома дерев'яними ручками, які дозволяють дріт витягнути в лінію. Таким чином, дріт знаходиться в площині магнітного меридіана.

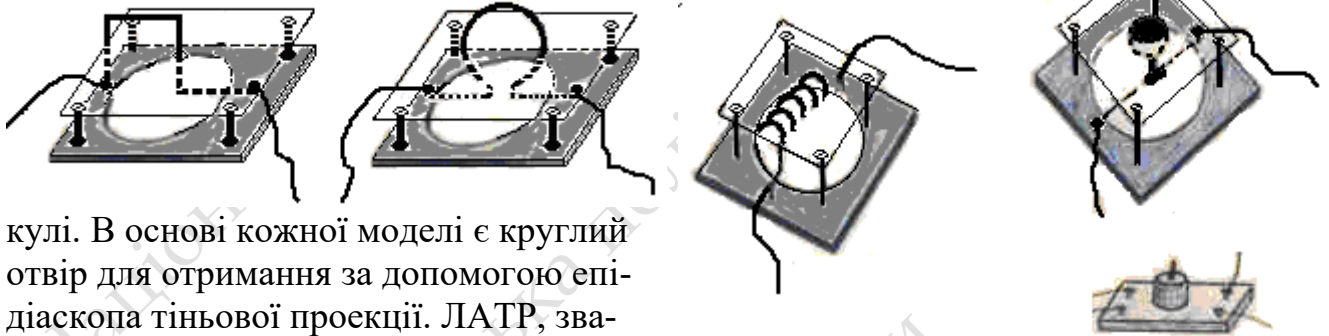
При натисканні демонстратором кнопки в одній з ручок (показує кнопку аудиторії!) вздовж

дроту пропускається великий струм. Під дією магнітного поля цього прямого струму магнітна стрілка повертається. Вона встановлюється уздовж рівнодіючої магнітного поля Землі і магнітного поля прямого струму, спрямованої перпендикулярно дроту зі струмом (за правилом гвинта).

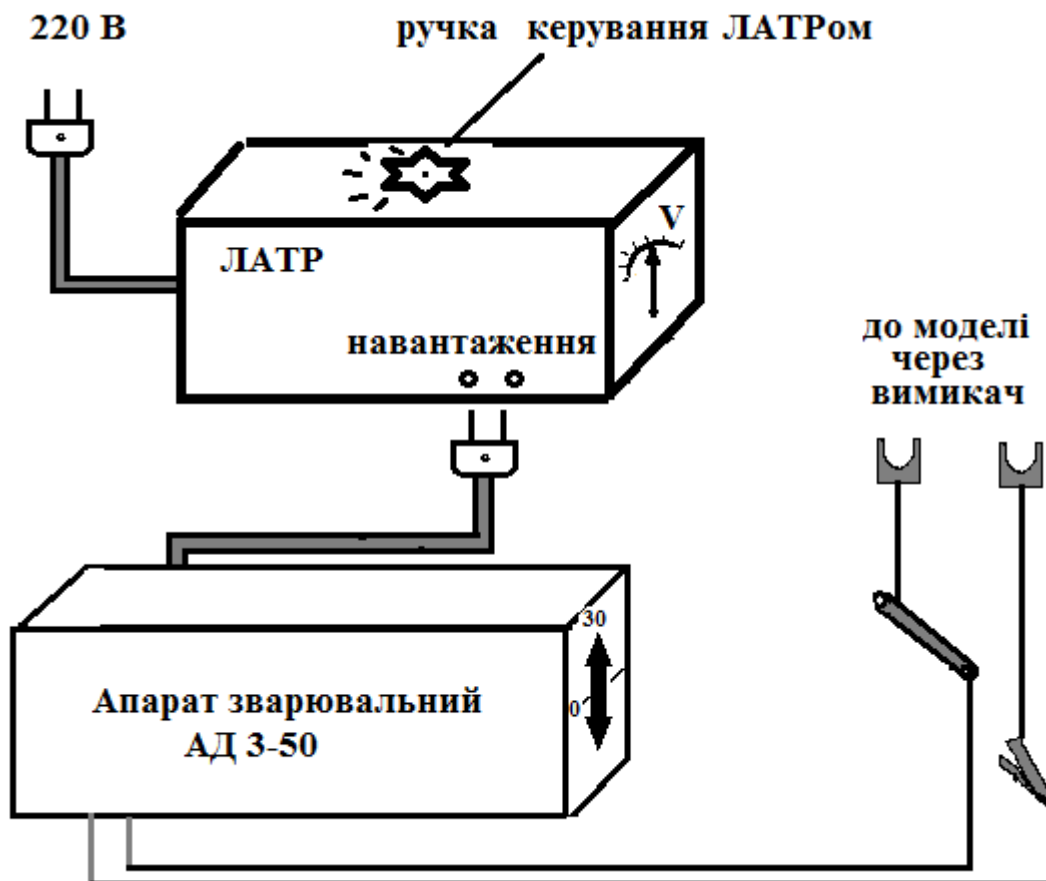
Якщо поміняти місцями дерев'яні ручки - держачи дроту, струм над стрілкою буде проходити в протилежному напрямку, і магнітна стрілка повернеться на 180°.

3.30. Магнітні поля різних провідників зі струмом

Прилади. Спеціальні прилади (4 шт) - в плексигласових пластинках просвердлені отвори, через які пропущений мідний дріт без ізоляції великого перерізу. Моделюються провідники різної форми - прямий струм, круговий струм, соленоїд і модель Земної



кулі. В основі кожної моделі є круглий отвір для отримання за допомогою епідіаскопа тіньової проекції. ЛАТР, зварювальний апарат як джерело великого постійного струму, епідіаскоп лі-



діас-
«По-

люкс», вимикач, з'єднувальні дроти.

Дослід. Дослід показують в тіньовий проекції, для чого моделі по черзі встановлюють на епідіаскоп. Зі спеціальної коробочки з дрібними отворами сиплють на пластинки дрібні залізні ошурки. При замиканні кола (пропускають короткочасно великий струм - на кришці ЛАТРа встановлюють **перемикач біля цифри 100** для трьох дослідів з дротами і близько нуля для моделі Земної кулі) і при постукуванні по платівці олівцем ошурки шикуються по силових лініях магнітного поля.

3. 31. Нерухомі моделі індукції магнітного поля в центрі та на осі кругового струму



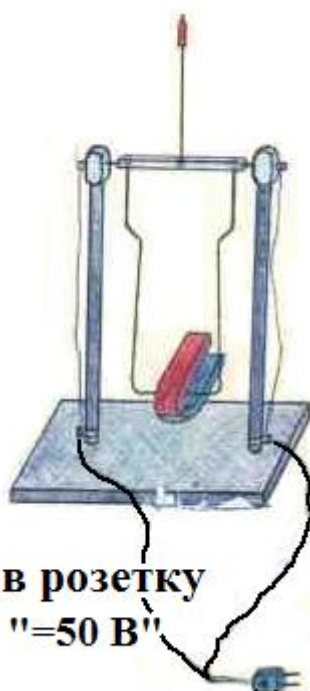
3. 32. Дія магнітного поля на струм («гойдалка»)

Прилади. На штативі в шарнірах, які одночасно струмопідвідними пристроями, може обертатися вкolo горизонтальної осі вільно підвішена дротяна мка. Живлення приладу здійснюється від джерела тійної напруги (розетка «= 50 В» на демонстраційному столі).

Дослід. У демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 встановлюють 6 В.

Нижню горизонтальну частину рамки поміщають між полюсами підковоподібного постійного гніту. При пропущенні струму по провіднику, він

сно
на-
ра-
пос-
но-



ма-

або втягується, або виштовхується з магніту. Це залежить від напрямку струму і магнітного поля. Щоб рух рамки було помітно аудиторії, зверху на осі укріплена стрілка.

Змінивши напрямок струму, змінюють напрямок сили, що виштовхує.

3.33. Дія магнітного поля на струм. Верстат Ампера

Прилади. Два горизонтальних паралельних мідних стержня на високому штативі утворюють «рейки», відрізок алюмінієвого дроту без ізоляції - «перемичка», підковоподібний магніт, джерело постійного струму.

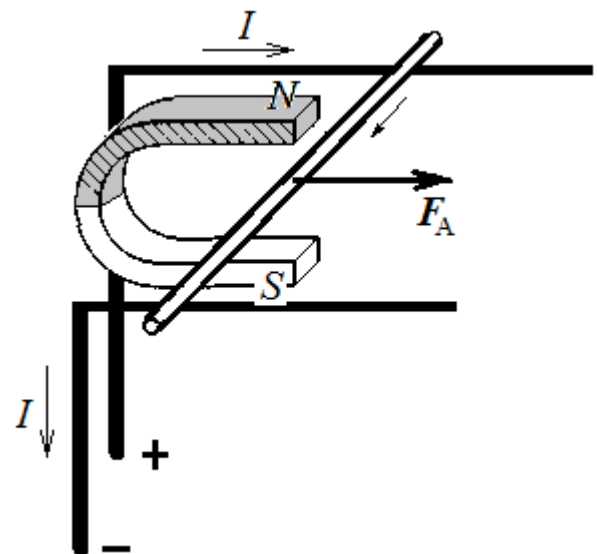


Дослід. Алюмінієвий провідник круглого перетину - перемичка - кладеться на рейки. Спочатку струму в рейках немає. Підноситься магніт. Перемичка не реагує (тому що алюміній - слабомагнітна речовина - парамагнетик).

Потім подають напругу 8 В від випрямляча КЕФ -8 в демонстраційній аудиторії. Прилад включають в розетку « $U=50\text{ В}$ ». Знову підносять магніт. Перемичка виштовхується або втягується в залежності від положення полюсів

магніту і напрямку струму, під дією сили Ампера починає перекидатись по рейках в ту чи іншу сторону.

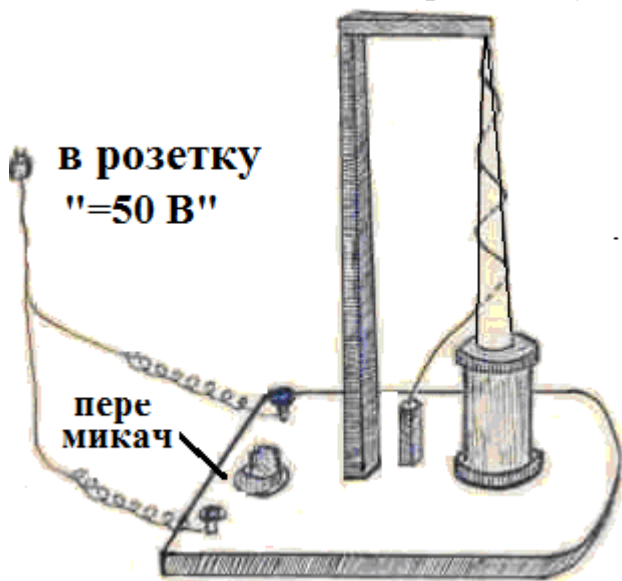
Рекомендація. Перед дослідом дрібним (нульовим) наждачним папером зачищають перемичку і рейки для кращого контакту. Крім того, перемичку вирівнюють прокатуванням на плоскій поверхні.



3.34. Дія магнітного поля на струм. Обвивання провідника зі струмом навколо сердечника електромагніту

Прилади. Електромагніт із сердечником у вигляді залізного конусного стрижня довжиною близько 50 см. Сердечник укріплений у вертикальному положенні. Гнучкий провід підвішений поруч із сердечником. Верхній кінець дроту закріплений на Г- подібній стійці. Нижня частина проводу проходить через підс-

таву стійки. Живлення приладу здійснюється від джерела постійної напруги (розетка «= 50 В» на демонстраційному столі).



Дослід. На випрямлячі КЕФ -8 встановлюють 18 В. Пропускаючи струм через дріт і котушку, спостерігають обвивання дроту навколо сердечника електромагніту. При цьому верхня частина проводу закручується в одному напрямку, а нижня - в іншому.

Можна змінити напрямок струму в проводі за допомогою перемикача на панелі приладу. Провідник при цьому спочатку розкручується, потім навивається по-іншому.

Пояснення досліду. Сила, яка діє на елемент струму, поміщений в дану точку магнітного поля, залежить від взаємної орієнтації електричного струму і магнітного поля (закон Ампера) (див., Наприклад, [1]).

Верхній і нижній кінці сердечника електромагніту мають різнойменні магнітні полюси. Тому напрямки сил Ампера, що діють на елементи струму, подумки виділених в гнучкому провіднику у верхній і нижній частинах, протилежні. Це викликає закручування провідника зі струмом навколо намагніченого сердечника.

3.35. Рамка зі струмом в магнітному полі. Модель електродвигуна постійного струму

Прилади. Невелика рамка з декількох витків мідного дроту може вільно обертатися навколо горизонтальної осі. До рамки за допомогою ковзних контактів - «щіток» - підводять постійну напругу. За допомогою підковоподібного магніту і полюсних наконечників рамка опиняється вміщеною в магнітне поле.



Дослід 1. На випрямлячі КЕФ -8 в демонстраційній аудиторії виставляють 14 В. Модель включають в розетку на демонстраційному столі з написом «= 50 В». Рамка обертається.

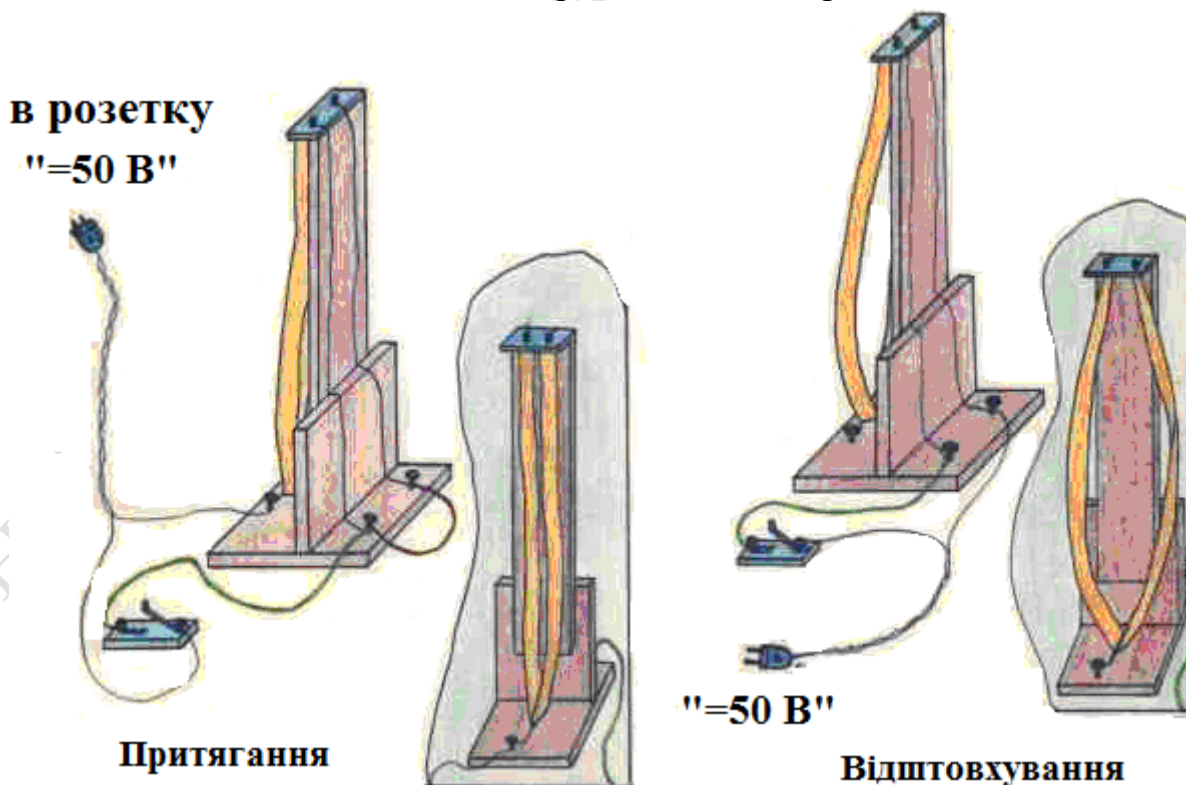
Пояснення досліду. Під час проходження електричного струму рамка орієнтується так, щоб вектор її магнітного моменту був спрямований уздовж зовнішнього магнітного поля. Рамка повертається. Під час подальшого обертання рамки за інерцією затискачі джерела струму з'єднуються з іншими колекторними пластинами. Напрямок струму в них змінюється на протилежний, і рамка продовжує подальше обертання.

Дослід 2 .. Змінюємо полярність напруги, що подається на рамку (цього можна добитися, якщо вийняти штепсель з розетки «= 50 В», повернути його на 180° і знову вставити). Рамка обертається в протилежному першому досліду напрямі.

Пояснення досліду. У електричних двигунів постійного струму можна реверсувати (змінити на протилежний напрям) обертання ротора. Для цього достатньо змінити напрям струму в обмотці на протилежний.

3.36. Взаємодія паралельних струмів

Прилади. Два провідника з фольги (провідні стрічки вирізують з розібраного паперового конденсатора) підвішені на штативі вертикально. Нижні кінці провідників підведені до однієї клеми, верхні - до двох окремих клем.



Дослід. Постійна напруга 14 В встановлюється в демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 з **короткочасним включенням**.

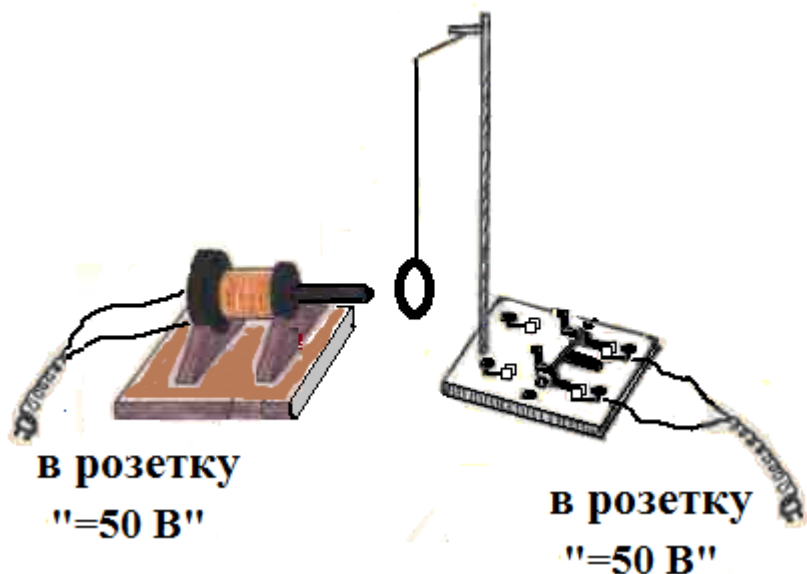
Якщо на задній панелі приладу з'єднати проводом затискачі, то провідники включаються паралельно і струми вздовж стрічок фольги проходять в одному напрямку. Між ними відбувається притягання. Пояснення див., наприклад, [1].

Якщо роз'єднати клеми на задній панелі приладу і підвести до них обидва дроти від випрямляча, то провідники таким чином з'єднуються послідовно, а струми в них будуть проходити в протилежних напрямках. Антипаралельні струми відштовхуються [1].

3.37. Котушка зі струмом в неоднорідному магнітному полі

Прилади. Електромагніт з виступаючим сталевим сердечником, який укріплений на підставці горизонтально. Підвішена на вертикальній стійці на гнучких

проводах плоска котушка мідного дроту. Вздовж проводів підвісу підводиться струм в котушку. Випрямляч КЕФ-8.



Дослід. Штатив з рухомою котушкою встановлюється так, щоб рухома котушка висіла перед сердечником на відстані близько 5 см. В демонстраційній аудиторії подають на розетку напругу 15 В від КЕФ -8.

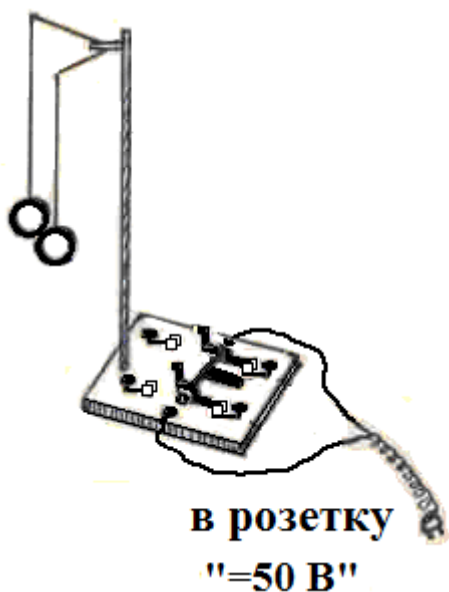
Під час включення струму в електромагніт рухлива котушка або відразу притягається до сердечника і надівається на нього, або спочатку відштовхується, перевертається на 180° і потім надіва-

ється на сердечник.

Пояснення досліду. На плоский контур зі струмом в неоднорідному магнітному полі крім сил обертання і деформації діють додаткові сили, які обумовлюють переміщення контура в сторону градієнта індукції магнітного поля (в залежності від напрямків струму і поля). (Див., наприклад, [1]).

3.38. Взаємодія двох котушок зі струмом

Прилади. На вертикальній стійці підвішені дві плоских котушки мідного дроту. Струм в котушки підводиться по дротах підвісу. На підставі стійки знаходиться перемикач напряду струму.



Дослід. Розсовують тримачі підвісів на штативі на деякий кут так, щоб котушки розміщалися паралельно одна одній.

У демонстраційній аудиторії подають на розетку напругу 15 В від випрямляча КЕФ -8.

Можна включати струм в котушках або паралельно, або послідовно.

При повороті перемикача струму котушки або відразу притягуються (якщо струми в них проходять в одному напрямку), або спочатку відштовхуються (струми в котушках є протилежними), потім одна з котушок перевертається на 180° і після цього котушки притягуються.

Пояснення досліду. Кожна з котушок зі струмом створює власне магнітне поле і знаходиться в магнітному полі сусідньої котушки. Ці поля є явно неоднорідними. У загальному випадку неоднорідного поля на котушку зі струмом буде діяти пара сил, що прагнуть повернути котушку, і сила, що втягує (в разі струмів в котушках одного напрямку) в область більш сильного поля або виштовхує (протилежні струми) і переміщає котушку в область слабшого поля.

3.39. Відхилення пучка електронів магнітом. Сила Лоренца

Прилади: підковоподібний магніт, катодна трубка зі щілиною і екраном, що люмінесцює за щілиною, високовольтний індуктор (котушка Румкорфа).

Дослід. У демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 встановлюють 11 В. Напівзатемнюють аудиторію.

Вторинні електроди котушки Румкорфа з'єднують гнучкими проводами-пружинками з електродами трубки Крукса. Включають котушку в розетку на демонстраційному столі з написом « $= 50 \text{ В}$ », а потім вимикачем на панелі котушки. Починає працювати високовольтний індуктор (котушка Румкорфа) і в круксовій трубці з'являється світіння. Вздовж діагоналі трубки розміщений екран, що флюоросцює і на якому видно прямолінійний слід пучка електронів. Підносять до катодної трубки магніт (підковоподібний магніт, як найбільш сильний з наявних магнітів). Спостерігається викривлення сліду пучка електронів на люмінесцентному екрані трубки. Повертаючи магніт на 180° , спостерігають відхилення пучка в протилежний бік.

Пояснення досліду. На рухомі електричні заряди з боку магнітного поля діє сила Лоренца [1].

Електромагнітна індукція

3.40. Основні досліди Фарадея

Прилади: дві котушки - великого і малого діаметра, мала котушка може вставлятися в більшу, прямий смуговий магніт, демонстраційний гальванометр, сталеве осердя з рукояткою, дроти сполучні, джерело постійного струму (від розетки на столі з написом « $= 50 \text{ В}$ », куди за допомогою випрямляча КЕФ -8 в демонстраційній аудиторії подають 6 В).

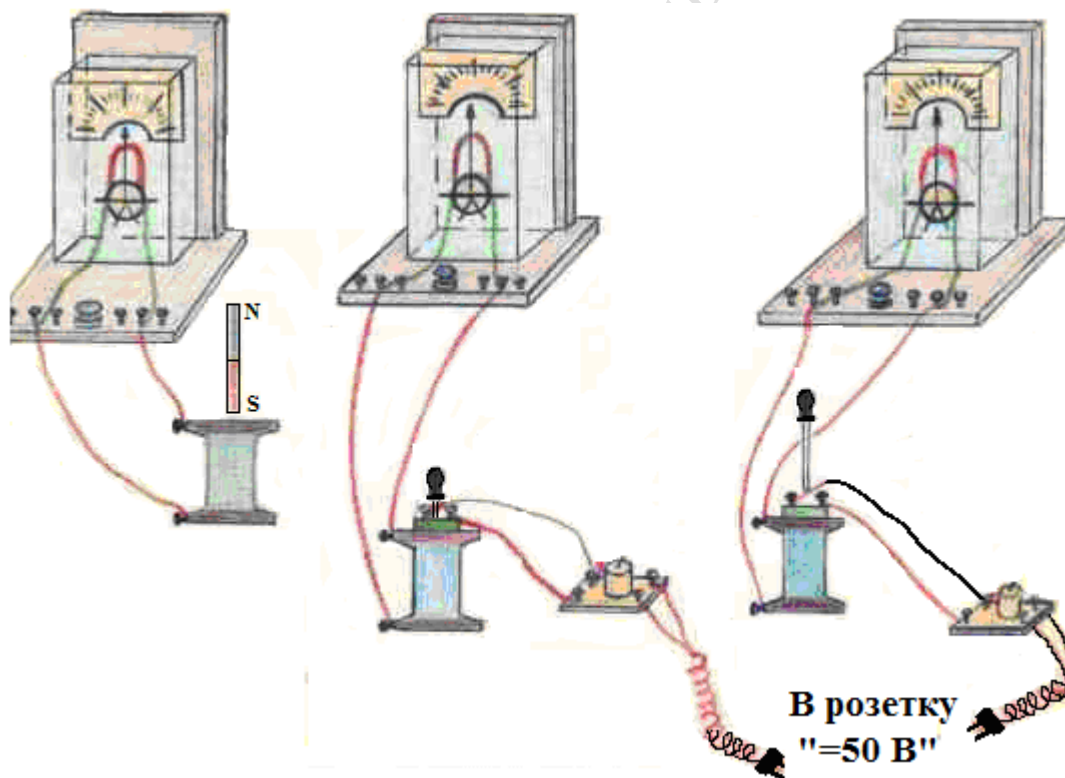
Досліди. Велику котушку з'єднують з гальванометром.

1). Магніт різко всувають в котушку. Відбувається відкидання стрілки гальванометра. Коли магніт зупиняється, стрілка гальванометра повертається у вихідне положення. При висуванні магніту відкидання стрілки відбувається в інший бік.

Змінюють полюс магніту, що вводиться. Виконують ті ж досліди. Швидко і повільно. Підкреслюють, що величина індукованого струму залежить від швидкості зміни магнітного потоку, а напрям - від знаку приросту магнітного потоку.

2). Потім у велику котушку вставляють електромагніт - котушку меншого діаметра зі сталевим осердям, що включена в розетку «= 50 В» та на яку з демонстраторської аудиторії подається 6 В. Роблячи ті ж рухи, що і в п. 1), спостерігають відхилення стрілки гальванометра. Ефект є набагато сильнішим.

3). Вкладають включений електромагніт у велику котушку, з'єднану з гальванометром.



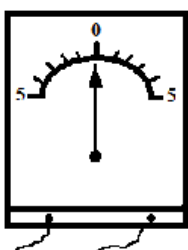
вставленої котушки сталеве осердя. У момент всування і висування осердя спостерігають значне відхилення стрілки гальванометра.

4). Нарешті, вимикають з розетки живлення малої котушки, що була попередньо вставлена у велику котушку. Знову спостерігають відхилення стрілки гальванометра.

Пояснення досліду. ЕРС індукції виникає, якщо потік Φ_B магнітної індукції B через поверхню, обмежену замкнутим провідним контуром, змінюється з якихось причин - або контур переміщається, повертається, деформується, обертається в постійному магнітному полі, або контур є нерухомим, а потік Φ_B змінюється за рахунок зміни магнітного поля B .

При цьому ЕРС \mathcal{E}_i електромагнітної індукції в контурі є пропорційною швидкості зміни потоку, тобто значенню похідної $\frac{d\Phi_B}{dt}$.

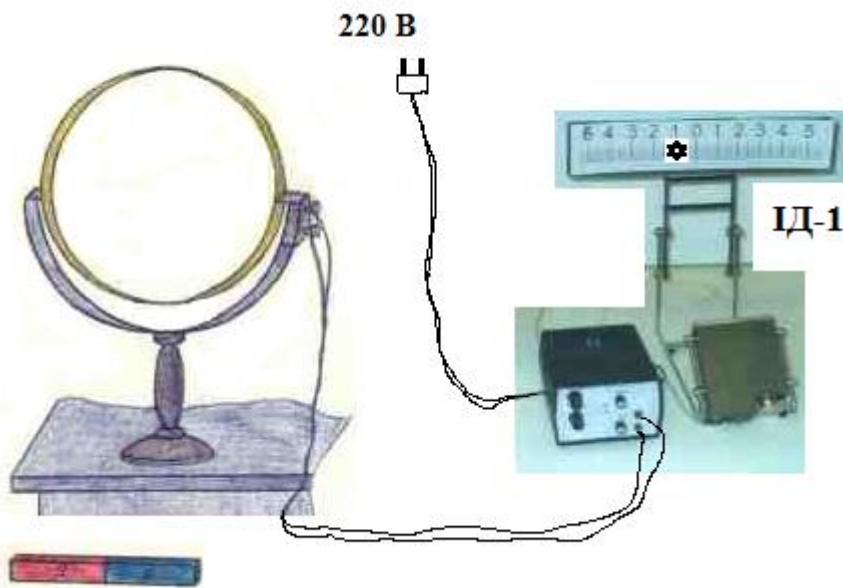
У всіх випадках 1) - 4) відбувається зміна магнітного потоку, що пронизує контур великої котушки, і реєструється струм індукції.



Примітка. Замість великого демонстраційного гальванометра часто демонстратори використовують шкільний гальванометр з нулем посередині.

3.41 Земний індуктор

Прилади. Земний індуктор, вимірювач демонстраційний ІД-1, магнітна стрілка, постійний магніт.



Індуктор являє собою соленоїд, виконаний у вигляді обруча, на який навіте велике число витків дроту. Індуктор може вільно обертатися навколо горизонтальної осі в обидві сторони. Струм індукції, що виникає в обмотці, знімається з проводів двома легкими контактами.

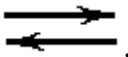
Ідея досліду: скористатися магнітним полем Землі і, обертаючи про-

відну рамку, отримати струм індукції.

Дослід. Соленоїд розміщують на демонстраційному столі. За допомогою магнітної стрілки визначають напрям Північ-Південь і т. ч. становище площини земного меридіана. Ставлять індуктор площиною перпендикулярно напрямку Північ-Південь. Тоді магнітне поле Землі буде направлено перпендикулярно площині індуктора.

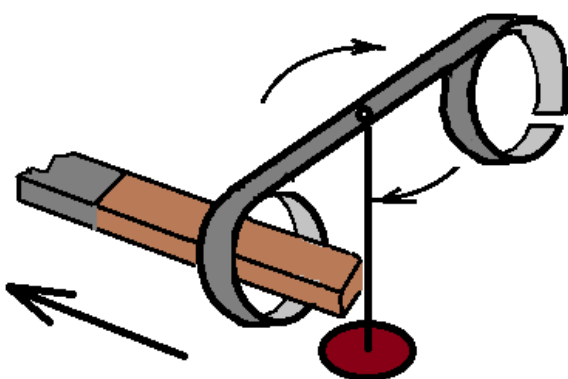
Спочатку «пробують» чутливість приладу, наближаючи до індуктора і віддаляючи від нього постійний магніт. Спостерігають за рухом «зайчика» на шкалі вимірювача.

Потім повільно повертають обруч соленоїда. «Зайчик» на шкалі дзеркального індикатора починає рухатися. Обертають в іншу сторону - «зайчик» рухається в протилежному напрямку.

Положення кнопок на передній панелі ІД-1: перемикач лівий верхній - V , нижній - $0,01 V$. Установка «зайчика» на середину – ручка .

Примітка. Дослід виходить більш наочним, якщо проектувати промінь лазера не на шкалу вимірювача, а на великий екран в аудиторії.

3.42. Демонстрація правила Ленца при виникненні індукційного струму



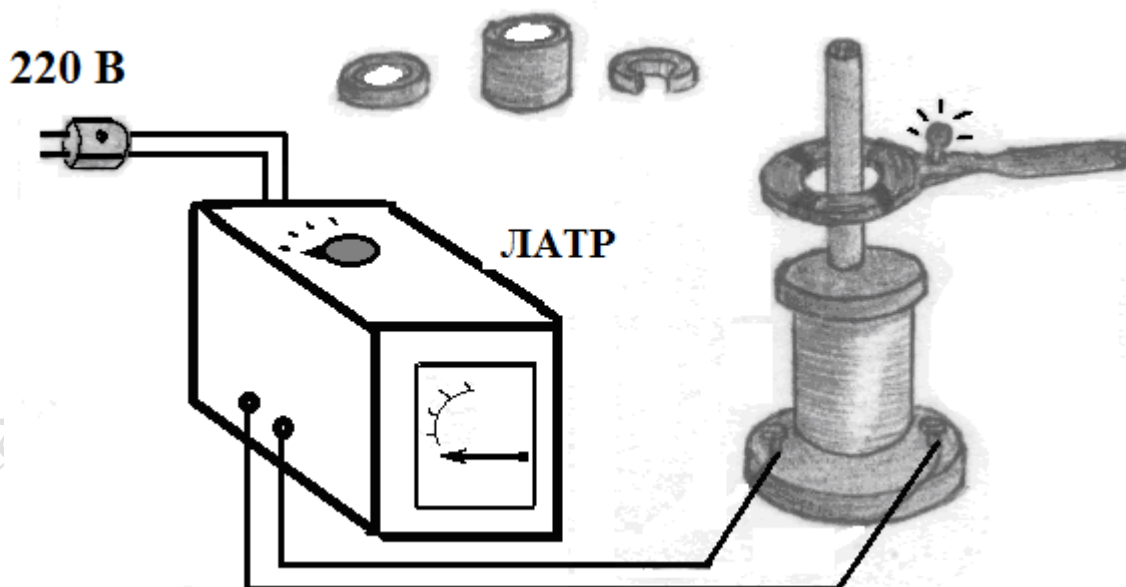
Прилади: прилад для демонстрації правила Ленца, постійний магніт.

Дослід. При русі магніту в замкнутому кільці воно починає рухатися. При всуванні магніту в суцільне кільце воно відштовху-

ється від магніту і коромисло повертається навколо вертикальної осі на вістрі. При висуванні магніту суцільне кільце прямує за ним. При русі магніту в незамкнутому кільці кільце не рухається.

Пояснення досліду. У всякому замкнутому провіднику при зміні магнітного потоку крізь площу, обмежену цим провідником, виникає індукційний струм. Згідно з правилом Ленца індукційний струм завжди має такий напрямок, щоб протидіяти зміні магнітного потоку, що викликав цей струм.

3.43. Скидання кілець (дослід американського винахідника Еліу Томсона)



Прилади. Вертикально розміщений електромагніт у вигляді соленоїда з осердям. Кінці соленоїда підключаються до виходу ЛАТРу, який вмикається в освітлювальну мережу (220 В). Кільця алюмінієві і мідні різної маси. Кільце з розрізом. Рамка, оздоблена ручкою, з декількох витків дроту з послідовно включеною лампочкою розжарювання,

Дослід. На осердя надягають широке кільце з легкого металу з малим питомим опором (з алюмінію).

Поступово збільшують напругу, що подається від ЛАТРу (від нуля). Кільце повільно піднімається і зависає на деякій висоті.

На кільце, яке висить, зверху можна підвісити ще кілька кілець. Окремо показують: кільце з розрізом не піднімається.

Можна заздалегідь надіти на осердя кільце. Встановити на ЛАТРі незначну напругу (не більше 100 В за мітками на кришці ЛАТРу) і раптово замкнути коло. Кільце підкидається і злітає з осердя. Можна «стріляти» декількома кільцями. Якщо замість алюмінію взяти важчу мідь, то кільце не буде підкидатися вгору, навіть якщо воно вільне, але при цьому також буде спостерігатися розігрів металу.

Якщо масивне кільце (що мається у наборі) надіти на осердя, притиснути двома руками донизу і утримувати (запрошується студент), то воно сильно розігрівається (через деякий час студент вже не може утримувати гаряче кільце).

Виникнення індукційного струму демонструється рамкою з електричною лампочкою. Рамку поступово насувають зверху на осердя, чим нижче опускається рамка, тим яскравіше горить лампочка.

Пояснення досліду. Суть досліду - демонстрація правила Ленца. Під час проходження змінного струму через обмотку соленоїда в осерді виникає змінне магнітне поле, що збуджує індукційні струми в кільці. Згідно з правилом Ленца, ці струми проходять таким чином, щоб зменшити те поле, яке їх створює, тобто вони проходять у бік, протилежний струмові в обмотці соленоїда.

Протилежні струми відштовхуються. В результаті між струмом в соленоїді і струмом в кільці виникає відштовхувальна сила Ампера.

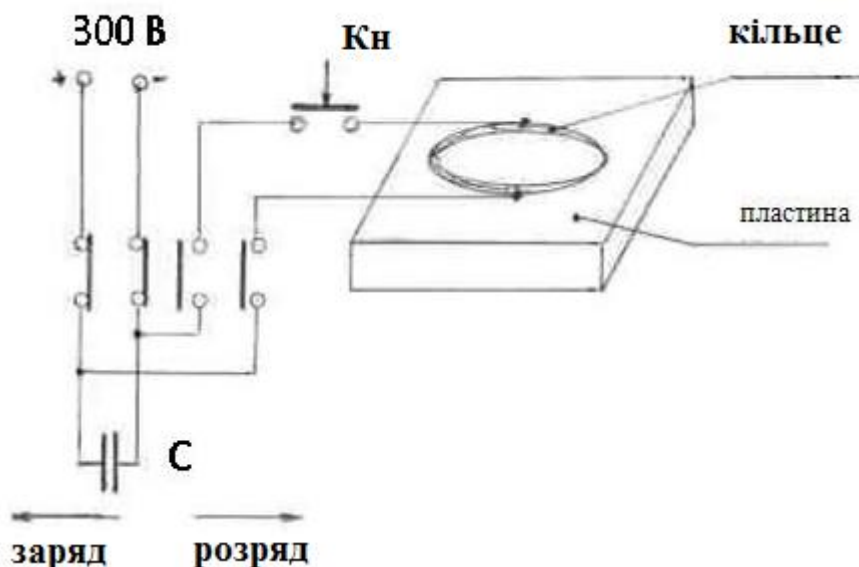
Якщо опір кільця є невеликим, то індукційний струм досягає значної величини, і сила відштовхування здатна підкинути кільце вгору. Якщо сили недостатньо, щоб підкинути кільце, або якщо утримувати кільце зовнішнім впливом, то збуджувані струми індукції призводять до розігрівання кільця відповідно до закону Джоуля - Ленца.

Зауваження. (Його можна не приводити в «слабких» лекційних потоках, щоб не затінювати основного змісту. Це зауваження - для лекторів).

Здавалося б, в змінному магнітному полі сила Ампера пів періоду спрямована вгору, пів періоду - вниз. В середньому виходить, що сила Ампера дорівнює нулю. Що ж змушує кільце злітати?

Кільце має деяку індуктивність L . Якщо магнітне поле змінюється з часом як $B \sim \cos \omega t$, ЕРС індукції тоді змінюється як $-\sin \omega t$, а струм індукції через наявність L змінюється як $\sin(\omega t + \alpha)$, тобто зсунутий за фазою на α . В середньому сила Ампера $|\langle F_A \rangle| \sim \sin \alpha$ відмінна від нуля. Кільце зависає.

3.44. Стрибуче кільце (дослід поставлений доцентом А.С. Зайцевим)



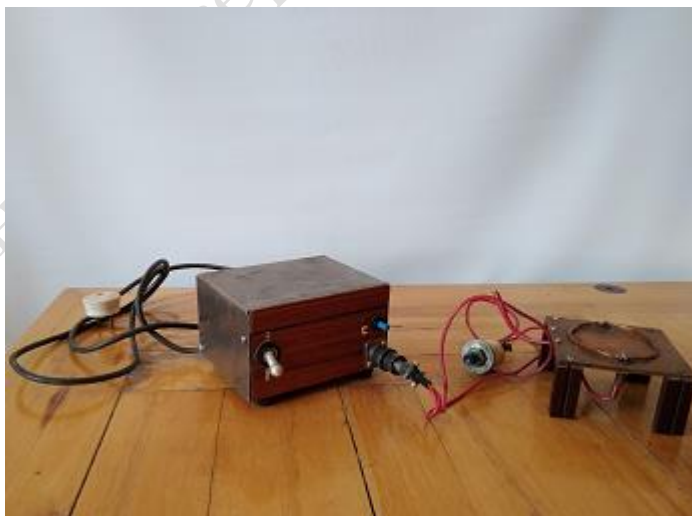
Прилади. Блок живлення, що дає постійну напругу 300 В і містить конденсатор ємністю 800 мкФ. Мідна пластина товщиною 4 мм, яка укріплена горизонтально за допомогою чотирьох ніжок-ізоляторів. На пластині лежить кільце з 12 витків мідного дроту (діа-

метр кільця 10 см, діаметр дроту 0,2 мм). По діаметру кільця розміщені два контакти, що входять в отвори пластини і одночасно фіксують кільце на пластині.

Дослід. Фіксують кільце на пластині. Блок живлення включають в мережу ~ 220 В. Прилад включається кнопкою «ВКЛ». У положенні тумблера «Заряд» заряджають конденсатор протягом декількох секунд.

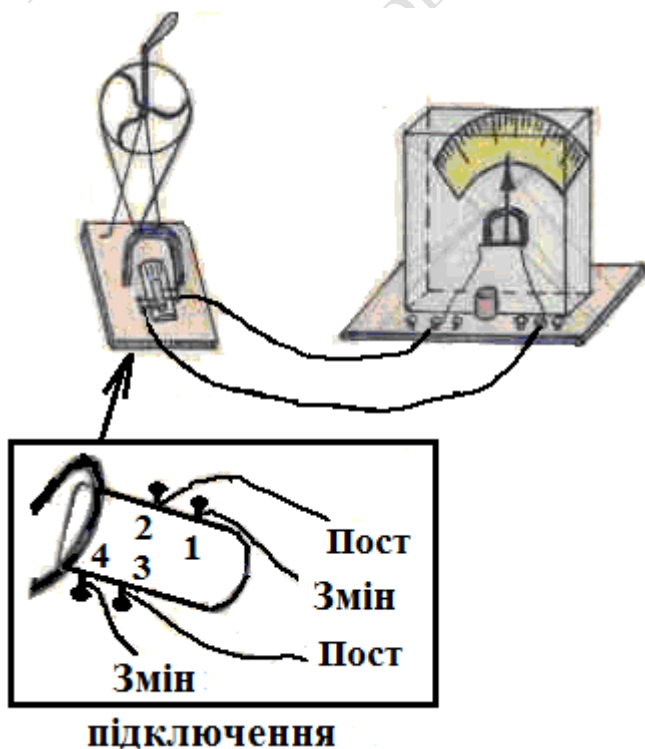
Потім переключають тумблер в положення «Розряд». Натискають кнопку «Кн». Кільце підскакує на кілька десятків сантиметрів.

Пояснення досліду. Розрядний струм в кільці індукує в мідній пластині вихровий індукційний струм (струм Фуко). Цей струм за правилом Ленца має напрям, антипаралельний струму в кільці. Антипаралельні струми відштовхуються. Внаслідок короткочасності процесу розряду конденсатора струми досягають значної величини.



3.45. Отримання змінного і постійного струму

Прилади. Між полюсними наконечниками постійного магніту може обертатися рамка з декількох сотень витків, насаджена на шків. Шків обертається за допомогою пасової передачі від колеса, яке обертається вручну. Кінці дроту рамки виведені на колектор. Клеми з металевими пружинами-щітками.



Можна, змінюючи порядок з'єднання щіток з гальванометром, отримувати або постійний, або змінний струм.

Якщо з'єднати з гальванометром щітки, що торкаються верхнього і нижнього кілець колектора (ці кільця суцільні), обертаючи ручку колеса, отримують **змінний струм**. Стрілка гальванометра з нулем посередині буде при цьому відхилятися вправо і вліво. *З'єднання:* на вхід гальванометра подаються дроти від клем 1 і 4.

Якщо щітки з'єднати із середнім розімкненим кільцем колектора, отримують постійний струм. Стрілка буде відхилятися в будь-який один бік від нуля. Збільшуючи швидкість обертання, можна

отримують постійний струм. Стрілка буде відхилятися в будь-який один бік від нуля. Збільшуючи швидкість обертання, можна

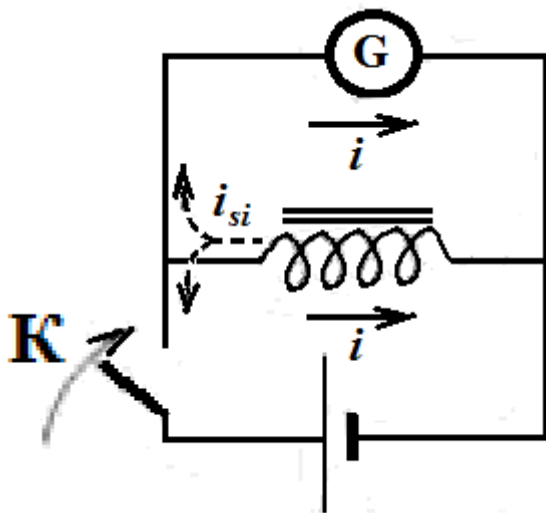
отримувати більший струм. З'єднання: від клем 2 і 3 подають дроти на вхід гальванометра.

Примітка. Останнім часом дослід спрощений. Обертаючи рамку, змушують світитись світлодіод.

3.46. Струми самоіндукції при замиканні і розмиканні кола. (Дослід А. Ейхенвальда)

Прилади. Гальванометр з нулем посередині і з пересувним упором на шкалі. Як індуктивність береться котушка з виступаючим осердям, або шкільний трансформатор з послідовно з'єднаними котушками. Джерелом постійної напруги є випрямляч КЕФ -8, розміщений в демонстраційній аудиторії. Напруга від нього (2 В) подається на розетку на столі з написом «50 В».

Дослід. Збирається схема відповідно до рисунка.

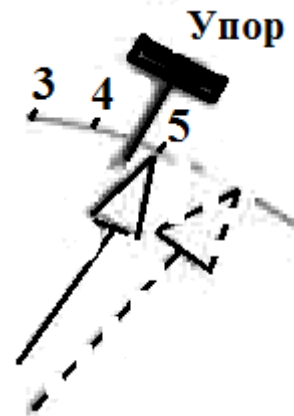


При замиканні ключа K струм від джерела розгалужується: частина його проходить через гальванометр, нуль якого знаходиться посередині шкали, а частина - через котушку індуктивності. Магнітний потік в котушці починає зростати і виникає ЕРС самоіндукції, що перешкоджає зростанню струму через котушку. Струм самоіндукції показаний на схемі пунктирною стрілкою.

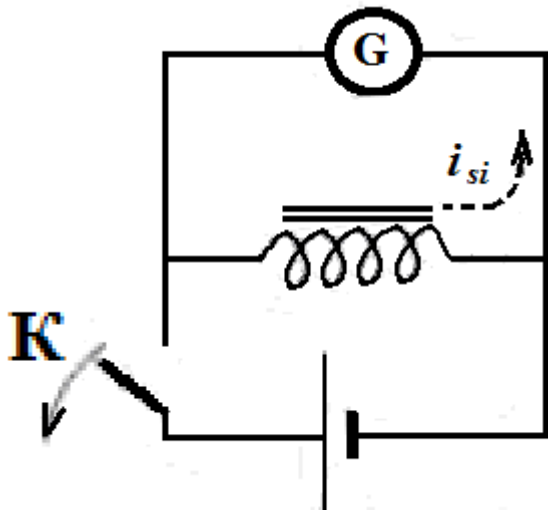
Струм самоіндукції теж розгалужується: частина його йде назад в джерело, частина - через гальванометр. Але стрілка гальванометра вже йде від нуля

вправо за рахунок основного струму.

Щоб побачити **тільки струм самоіндукції** (додатковий до основного), ми спочатку замикаємо коло, стрілка відхиляється на деяке число поділок (наприклад, 5). Встановлюємо упор, як показано на рисунку, тобто зліва від стрілки в тому положенні, яке вона займе потім після зникнення перехідних процесів. Тоді відкидання стрілки вправо від фіксованого положення реєструє **тільки струм самоіндукції**.



Струм самоіндукції **при розмиканні** кола. При замкнутому ключі струм батареї розгалужується: частина його проходить через гальванометр, а частина - через котушку індуктивності. При розмиканні кола магнітний потік в котушці починає спадати, і виникає ЕРС самоіндукції, що перешкоджає спаданню струму через котушку.

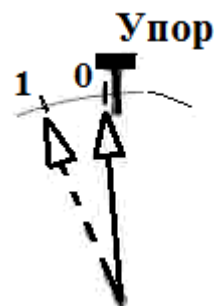


Але батарея вже відключена, тому струм змушений йти через гальванометр, причому в напрямку, протилежному первісному. Стрілка гальванометра має відхилитися в протилежну сторону - вліво. Але стрілка вже йде вліво до положення нуля, тому що основний струм від батареї припинився.

Щоб побачити тільки струм самоіндукції, ми заздалегідь поставимо

обмежник в нулі праворуч від стрілки, не даючи їй можливості показувати основний струм в стаціонарному стані. Відхилення стрілки вліво при розмиканні ключа і покаже наявність струму самоіндукції.

Додаток. Можна замінити гальванометр автомобільною лампочкою на 6-12 В. При замкненому колі лампочка ледве горить, в момент розмикання кола вона яскраво спалахує.

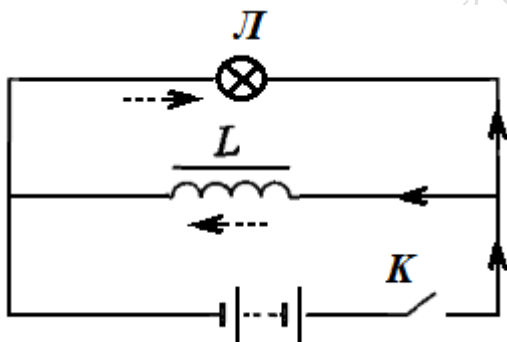


3.47. Явище самоіндукції. Екстраструми розмикання

Прилади. Котушка великої індуктивності (близько 0,5 Гн) з осердям. Джерело постійної напруги (9 В). Автомобільна лампочка з робочою напругою 13-16 В. Сполучні дроти.

Дослід. Збирають добре відому схему згідно з рисунком. Замикають коло ключем. При замкненому ключі лампочка світить тьмяно. При розмиканні кола лампочка яскраво спалахує.

Пояснення досліду. Після виключення джерела постійної напруги в замкнутому колі з послідовно з'єднаних лампочки L і котушки індуктивності L сила струму починає спадати. Спадає з часом і магнітний потік, що пронизує витки котушки. В результаті цього, в витках котушки виникає струм самоіндукції (показаний пунктирною стрілкою), спрямований за правилом Ленца так, щоб протидіяти зміні струму в колі, тобто який підтримує початковий струм (показаний суцільною стрілкою).



У підсумку в момент розмикання через лампочку проходить струм, який спрямований проти початкового струму до розмикання.

Струм самоіндукції, що виникає при розмиканні електричного кола, називається *екстраструмом розмикання*.

За великих L екстраструми розмикання можуть значно перевищувати струми в колі від джерела.

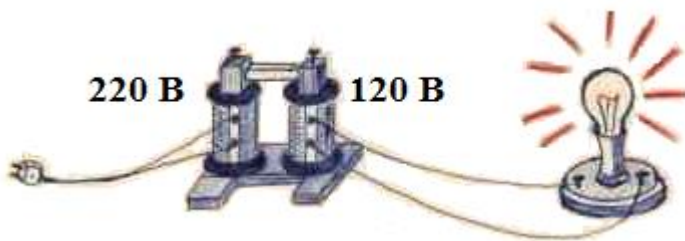
3.48. Трансформатор

Прилади: трансформатор шкільний, лампа розжарювання на 220 В на підставці, ЛАТР.

Зміст досліду. Трансформатор може працювати як підвищувальний, так і знижувальний.

Дослід 1. Знижувальний трансформатор. До контактів первинної котушки трансформатора (220 В) під'єднують живлення від мережі 220 В., а до вторинної котушки (120 В) під'єднують лампу розжарювання, розраховану на 220 В. Лампа горить не яскраво, в пів розжарення.

Дослід 2. Підвищувальний трансформатор. Міняють місцями лампу розжарювання і вхідне живлення. На вторинну котушку тепер подають 120 В за допомогою ЛАТРу, а на первинній котушці отримують напругу 220 В. Лампа горить яскраво, в повне розжарювання.



Дослід 3. Вплив осердя на роботу трансформатора. У досліді 2 висувають із затискачів осердя. При висуванні осердя яскравість горіння лампи зменшується, при всуванні - збільшується.

Зауваження. Перед демонстрацією знімають шунт, що з'єднує котушки послідовно.

3.49. Захоплення провідника рухомим магнітним полем (дослід Араго)

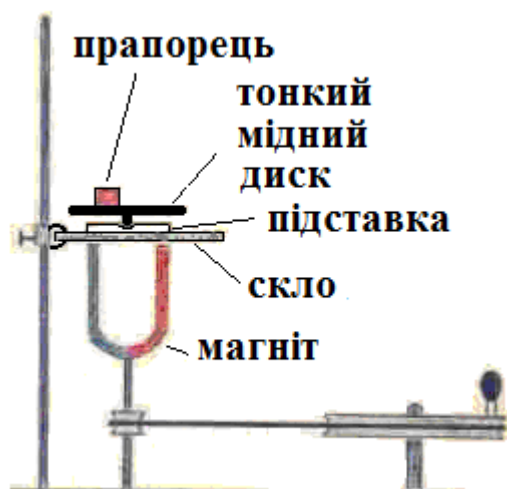
Прилади: відцентрова машина, підковоподібний магніт, штатив з укріпленою пластиною скла, мідний диск з вістрям посередині, підставка з заглибленням, в яке вставляється вісь мідного диска.

Дослід. Постійний підковоподібний магніт укріплений на осі відцентрової машини так, що вісь обертання проходить через нейтральну лінію магніту. Над магнітом на скляній пластині розміщена підставка, в поглиблення якої вставляється вістря мідного диска.

Під час обертання магніту мідний диск повертається в бік обертання.

Пояснення досліду. При обертанні магніту в мідному диску виникають індукційні вихрові струми. Згідно із законом Ленца вони мають такий напрямок, щоб заважати причині свого виникнення.

Тому мідний диск захоплюється магнітом, що обертається. за рахунок взаємодії магнітного поля з вихровими струмами в диску.



Диск відділений від магніту склом, щоб усунути повітряні потоки.

Лектор додає: цей дослід демонструє магнітне поле, що обертається, і захоплення ним ротора електродвигуна.

3.50. Вихрові струми в масивних провідниках (струми Фуко). Гальмування коливального маятника

Прилади. Електромагніт, мотор-генератор, набір маятників, стійка для маятників, алюмінієва пластина, вимикач, з'єднувальні дроти.

Дослід. 1. Демонструють поки не включений електромагніт. Живлення обмоток здійснюється через товсті мідні дроти дуже великим постійним струмом. Його отримують за допомогою мотор-генератора. У зазорі між полюсними наконечниками індукція магнітного поля становить $B \approx 0,1$ Тл.

2. Є два маятника, виготовлених з товстої мідної пластини. Один - суцільний, другий - з прорізами по всій довжині (для демонстрації прорізів лектор вставляє в них аркуш білого паперу). В маятнику з прорізами величина струмів Фуко



буде, природно, меншою, ніж в суцільному маятнику.

3. Поруч з електромагнітом збирають стійку, в яку по черзі вставляють і закріплюють маятники. Площину хитань маятника **ретельно** регулюють так, щоб маятник **не зачіпав** полюсні наконечники.

Спочатку розгойдують маятник з розрізами між полюсами **не включеного електромагніту**. Маятник, що наведений в рух, коливається з малим згасанням.

4. Потім включають струм **на короткий час** - 3 - 4 повних хитань маятника - (обмотки електромагніту живляться дуже великим струмом, довго тримати включеним не можна!). Коливання маятника помітно гальмуються, він здійснює декілька згасаючих коливань. Вимикають струм.

5. Тепер черга суцільного маятника. Міняють на підвісі маятник. Відводять його в сторону і відпускають. Знову на короткий час включають живлення обмо-

ток. Токи Фуко є настільки великими, що коливання стають аперіодичними - маятник підходить до стану рівноваги і зупиняється.

6. Демонструють пластину алюмінію. Al - діамагнетик, слабомагнітний матеріал. Проводять кілька разів пластиною між полюсами відключеного магніту. Потім на короткий час включають магніт. Знову проводять пластиною між полюсами. Тепер рух пластини відбувається так, нібито вона рухається в дуже в'язкому середовищі.

Приловчившись, можна змусити пластину висіти в повітрі і обертатися між полюсами. Викликають студента і просять його поводити пластиною при вимкненому і включеному магніті. Результат викликає позбавлення в аудиторії.

Пояснення досліду. Струми Фуко - індукційні струми, що виникають в суцільних масивних провідниках. Як і всякі індукційні струми, вони спрямовані так, щоб протидіяти причини, яка їх викликала. В даному випадку такою причиною є коливання маятника в магнітному полі. Маятник з прорізами не відразу зупиняється, а здійснює кілька загасаючих коливань, так як через прорізи виникнення вихрових струмів утруднено.

Коли алюмінієва провідна пластина падає між полюсами магніту, за рахунок її руху в ній виникають струми Фуко. За правилом Ленца струми спрямовані так, щоб заважати причині, яка їх викликала. Тобто амперови сили будуть гальмувати падіння пластини, і вона зависає в повітрі.

Вказівки для лекційного демонстратора.

Мотор-генератор під столом в лекційній аудиторії служить для отримання постійного струму з змінного. Він являє собою електродвигун, з'єднаний валом з електричним генератором.

Мотор-генератор включається зліва на великому демонстраційному столі в дві розетки відразу (цифри 1,2,3 на вилці та на розетці) за допомогою спеціальної рознім - вилки на кінці дроту, що йде від мотор - генератора.

Тримати включеним електромагніт можна не більше 5-10 секунд.

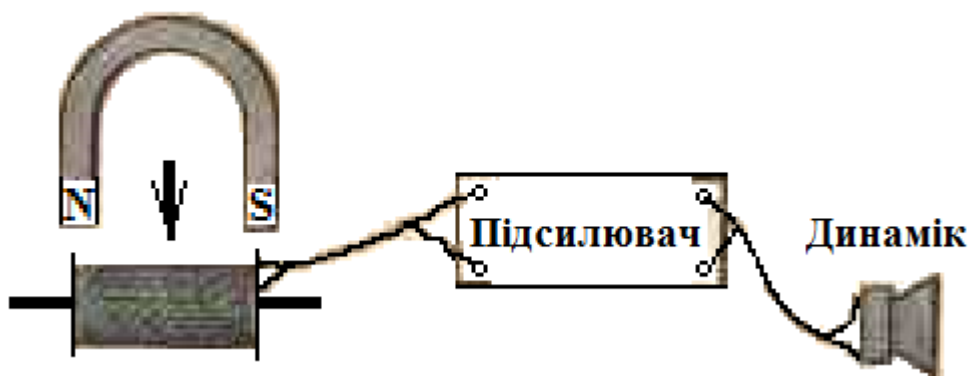
Магнітне поле в речовині

3.51. Стрибокподібне намагнічування. Ефект Баркгаузена

Прилади: горизонтальна котушка на підставці, набір осердя (пермалоеве, нікелеве, залізне, мідне, алюмінієве), підсилюючий пристрій Трємбіта-101, звукова колонка, постійний підковоподібний магніт.

Теорія і дослід. Під час намагнічування феромагнетика ті домени, в яких напрям магнітного моменту є енергетично вигідним, ростуть за рахунок сусідніх доменів, в яких напрями магнітних моментів є не настільки вигідними. Іншими словами, відбувається перебудова кристалічної решітки, переміщення границь доменів. Їх можна почути.

Для цього зразок феромагнетика (нікелевий стержень) закріплюють усередині дротяної котушки. Виводи котушки подають на підсилювач, а з нього - на динамік (див. рис.).



Підносять підковоподібний постійний магніт до котушки. У міру наближення магніту магнітне поле, що діє на стержень, посилюється і починається швидко зростання намагніченості нікелю. У цей момент **в динаміці чутні тріски і шуми.**

Це підтверджує існування у феромагнетика областей спонтанної намагніченості - доменів. Під дією магнітного поля відбувається переорієнтація магнітних моментів доменів. Домени, магнітні моменти яких спрямовані уздовж зовнішнього поля, ростуть за рахунок сусідніх. Відбувається зсув границь доменів. При русі межа між доменами затримується на неоднорідностях кристала. При подальшому збільшенні магнітного поля межа зривається і переміщується стрибком. Це і означає **стрибкоподібний характер намагніченості.**

Магнітний потік крізь котушку, в яку вставлений феромагнітний стержень, змінюється також стрибками, що викликає появу в ній імпульсів індукційного струму. Зміни струму в колі котушки підсилюються і подаються на динамік. В динаміці пролунає відповідний сигнал у вигляді клацання, від багатьох клацань - тріск, що перетворюється в шум і навіть в гуркіт.

Коли магніт наблизиться майже впритул до котушки, тріски в динаміці припиняються. Стержень намагнітився до насичення. Якщо тепер видаляти магніт від котушки і рухати магніт поступально, то клацання в динаміці не виникають або з'являються, але слабші. Це говорить про відсутність змін в намагніченості осердя.

Видаливши магніт на значну відстань, повертають його на 180° і знову наближають його до котушки. Гуркіт в динаміці свідчить про перемагнічування осердя котушки.

Можливий інший *варіант досліду*. Магніт наближають до котушки до зникнення шумів, а потім повільно обертають його в руці. Гуркіт в динаміці викликаний лавинним перемагнічуванням осердя.

Дослід повторюють з залізним стрижнем (цвяхом). Шуми в динаміці також виникають, але менші.

Якщо тепер замінити осердя котушки рулончиком пермалою, то множина імпульсів зливається в шум, схожий на шум морського прибою.

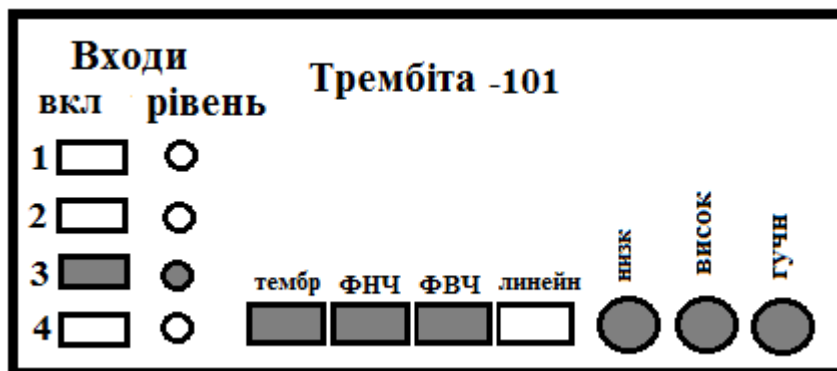
Пермалой - сплав з магнітно-м'якими властивостями, що складається з заліза і нікелю (45-82% Ni) .. Сплав має високу магнітну проникність ($\mu \sim 100\ 000$) і малу коерцитивну силу (легко перемагнічується). У тонких плівках поле, необхідне для повороту намагніченості, є досить малим.

На закінчення в котушку вставляють стерженьки Al або Cu - тріска в динаміці чутно не буде. Це говорить про те, що у діа (Cu) - і пара (Al) - магнетиків доменів відсутні.

Вказівки для лекційного демонстратора.

Передня панель підсилювача: кнопки «тембр», «ФНЧ», «ФВЧ» включені (натиснуті).

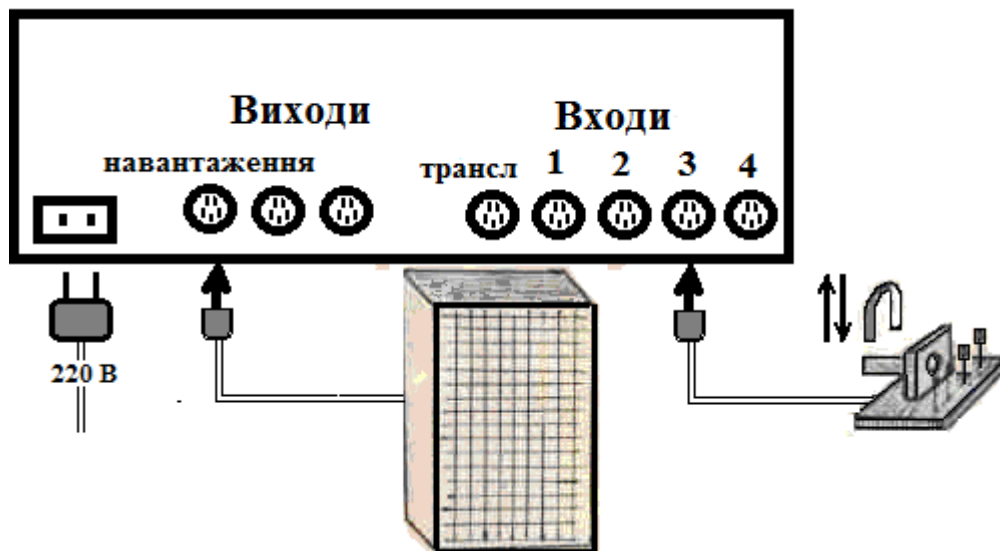
Кнопка «вкл» «3»
Ручка «рівень»
Ручка «висока», повернені



ка «Входи» натиснута. «Входи» «3» повернення бі- «низька», «гучність» до максимального значення -

Ручки «висока», повернені мального тобто вправо за годинниковою стрілкою до упору.

Задня панель підсилювача.



3.52. Демонстрація постійного магніту ($B \sim 0,01$ Тл), до якого підносять залізний ключ

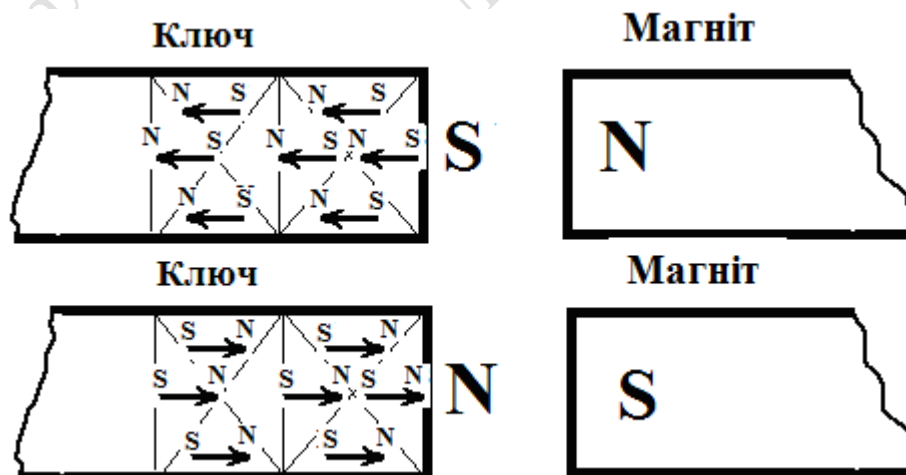
Прилади: унікальний постійний магніт, залізний ключ.

Дослід. Намагніченість заліза така, що залізний *ключ завжди притягується до будь-якого полюсу магніту* - N (синього) або S (червоного). Якщо провести



ключем між полюсами магніту - він обов'язково притягнеться до того полюса, до якого знаходиться ближче.

Пояснення досліду. Під час піднесення ключа до N - полюсу магніту в залозі відбувається зміщення границь, зростання доменів і обертання магнітних моментів уздовж енергетично вигідних напрямків (так, щоб їх потенціальна енергія була б мінімальною), тобто на ближньому кінці ключа виникає S-полюс (див. рис.). Ключ притягується. І навпаки (див. другий рис.). Ключ теж притягується.



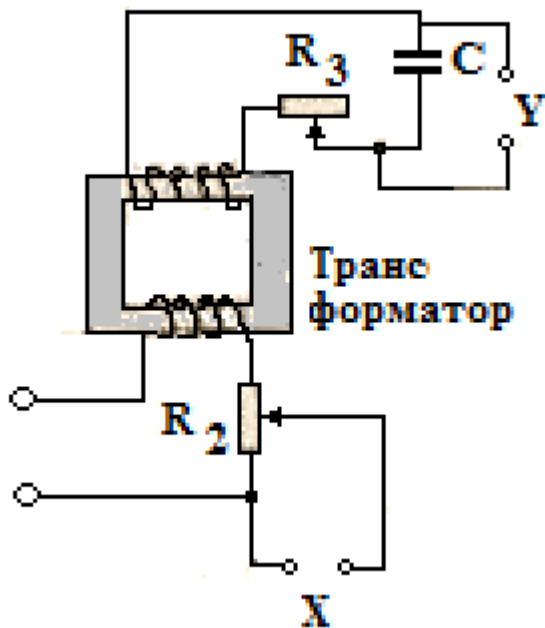
3.53. Петля гістерезису на електронному осцилографі

Прилади: осцилограф С1-1, реостати на 4300 Ом і 40 Ом, ЛАТР, конденсатор 10 мкФ, універсальний шкільний трансформатор 1: 2 (120 х 220).

Існує два способи демонстрування петлі гістерезису на осцилографі: 1) метод магнітних зміщуючих полів і 2) метод електричних зміщень.

Тут використовується метод електричних зміщуючих полів.

Суть досліду. Необхідно викликати відхилення електронного променя осцилографа в двох взаємно перпендикулярних електричних полях. Перше відхилення має бути пропорційним *напруженості* магнітного поля, що намагнічує ферромагнетик, а друге - пропорційним його *індукції*.



(X).

Вторинну обмотку трансформатора замикають через опір R_3 і ємність C . Змінну напругу, що виникає на конденсаторі C , подають на вертикально відхиляючі пластини осцилографа (Y). Якщо реактивний опір конденсатора є багато менший опору R_3 , то змінна напруга на конденсаторі буде пропорційною зміні **індукції** в осерді трансформатора.

В результаті світна точка на екрані малює петлю гістерезису.

Підбирають такі параметри роботи осцилографа, щоб на екрані добре було видно ділянку петлі гістерезису, яка відповідає полям насичення.

Ручки управління на осцилографі С1-1 знаходяться в наступних положеннях:

Діапазон частот - викл.

Синхронізація - внутрішня.

Ослаблення по осі Y: 1: 100

Посилення: по X - 1, по Y - 0,4.

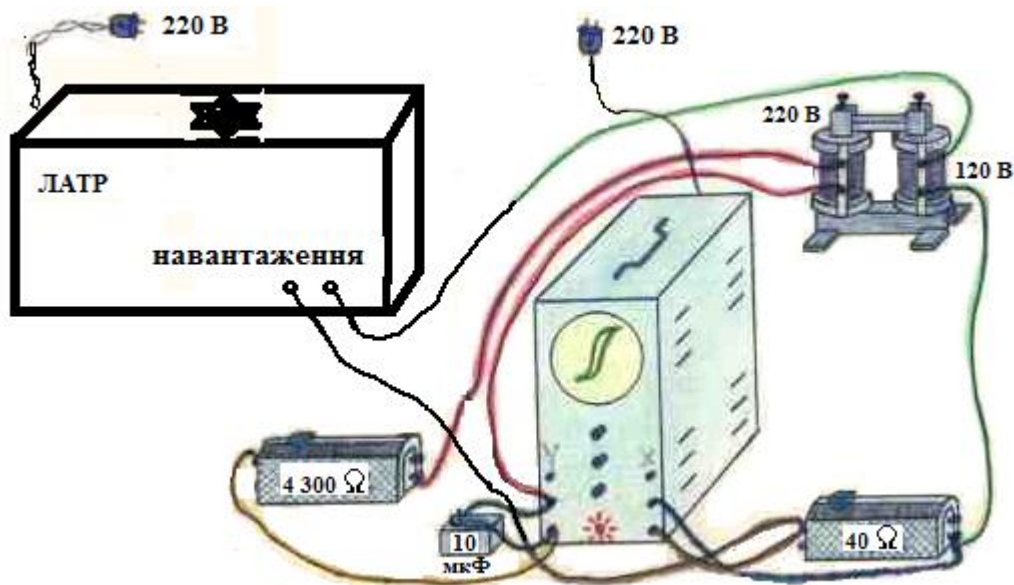
Амплітуда синхронізації за 10

В цьому випадку результуюче відхилення електронного променя буде відповідати кривій зміни індукції у ферромагнетика при зміні напруженості магнітного поля, що його намагнічує, тобто петлі гістерезису.

Дослід. Трансформатор з відношенням витків 1: 2 включають в мережу. У первинне коло трансформатора включають опір R_2 .

На кінцях опору R_2 виникає змінна ЕРС, величина якої пропорційна **напруженості** магнітного поля, що намагнічує сердечник.

Цю ЕРС подають на пластини осцилографа, що викликають горизонтальне відхилення електронного променя

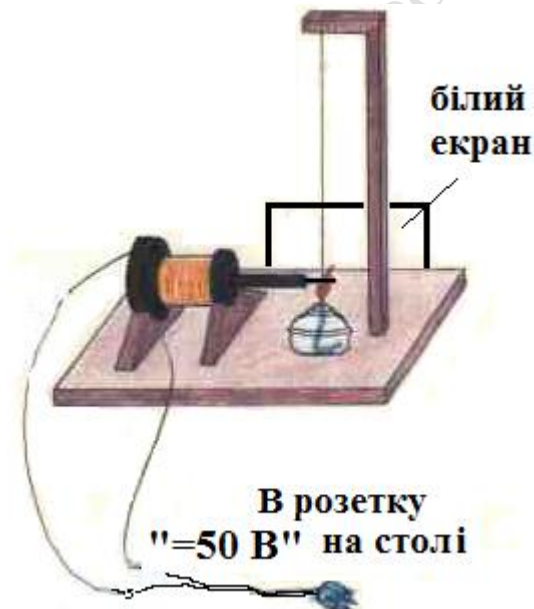


Пояснення досліду див., наприклад, [1].

3.54. Точка Кюрі феромагнетика

Прилади. Нікелевий стерженьок, підвішений на штативі на металевій нитці. Котушка з виступаючим залізним осердям. Спиртівка. Екран.

Дослід. Дослід ілюструє явище переходу феромагнетика у парамагнітний стан при деякій температурі, яка називається точкою Кюрі. Для заліза ця температура 769° , для нікелю 355°C .



Поблизу підвішеного стерженька на відстані 2-3 см розміщується осердя електромагніту. При включенні постійного струму в обмотку електромагніту стерженьок намагнічується і притягується до магніту. Потім підносять запалений пальник так, щоб зразок виявився в найбільш гарячій частини полум'я. При досягненні точки Кюрі, стерженець втрачить феромагнітні властивості, перетвориться в парамагнетик і відпаде від полюса електромагніта.

Якщо припинити нагрівання і дати зразку охолонути, він знову стане феромагнітним і притягнеться до полюса електромагніта.

Зауваження. Пальник замінюється таблетками сухого спирту. Щоб усім було краще видно, як відходить стерженьок від полюса електромагніту, ззаду підставляють білий екран.

Підвіс здійснюється металевим дротом, щоб він не згорів у полум'ї. Напруга 10 В від випрямляча КЕФ -8 подається на розетку «= 50 В».

Пояснення досліду. З підвищенням температури внаслідок теплових коливань атомів паралельність їх магнітних моментів порушується й за деякої температури, яка називається **точкою Кюрі**, домени зникають - феромагнетик переходить в парамагнітний стан, а його магнітна сприйнятливість зменшується на 8 - 9 порядків. Після охолодження зразка в ньому знову формуються домени, він знову стає феромагнітним.

3.55. Намагнічування залізного стрижня ударом в магнітному полі Землі

Прилади: залізний стрижень, молоток, стрілка магнітна.

Дослід. Підносимо до магнітної стрілки залізний стрижень. Стрілка притягується до будь-якого кінця стрижня (пояснення дано в досліді 3.52 з великим магнітом).

Далі розміщуємо стрижень в магнітному полі Землі в площині магнітного меридіана (використовуючи показання стрілки компаса). Тримаючи стрижень за середину лівою рукою, робимо правою рукою кілька сильних ударів в один з його торців молотком.

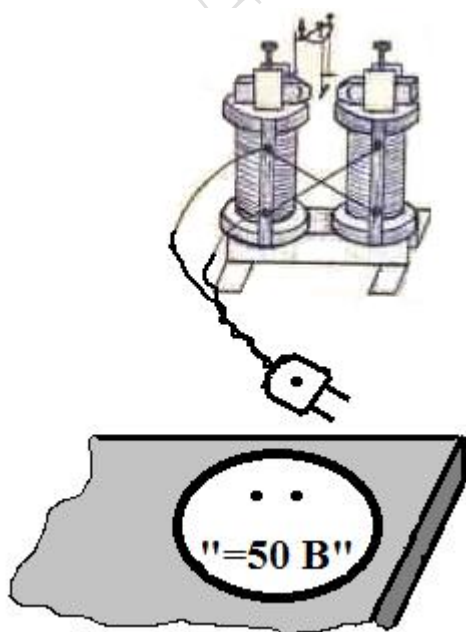


Щоб переконатися, що стрижень намагнітився, підносимо його кінці по черзі до магнітної стрілки. Північ від півночі відштовхується, північ до півдня притягується.

(В разі не намагніченого стрижня обидва його кінці будуть притягатися).

Причина намагнічування - полегшення повороту доменів під час удару в магнітному полі Землі.

3.56. Властивості діа- і пара- магнетиків

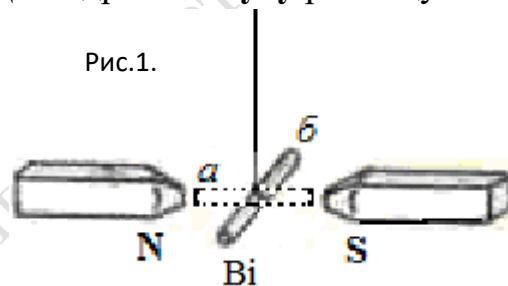


Прилади. Освітлювач «Світязь Авто», проєкційний об'єктив, поворотна призма, розбірний трансформатор з виїнятою верхньою частиною осердя, обмотки якого з'єднані як у електромагніта, 2 полюсних осердя - наконечника, штатив з тонкими нитками підвісу, зразки діа- і парамагнетиків, набір дерев'яних підставок.

Дослід. Між полюсами електромагніта по черзі розміщуються зразки (маленькі стерженьки, підвішені на пружних нитках) діа - (вісмут Ві) і пара (магній Mg) магнетиків. Оскільки спостерігається поведінка слабомагнітних тіл, всі тіла мають мікроскопічні розміри і картина проєктується на великий екран аудиторії.

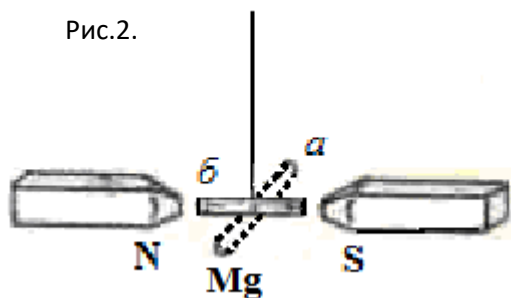
Підготовка досліду. У демонстраційній аудиторії на випрямлячі КЕФ -8 встановлюється 40 В.

Перший дослід - поведінка діамагнетиком. Циліндрик **вісмуту** розміщується демонстратором **уздовж поля** (поз. *a* на рис.1). Потім включається живлення електромагніта і створюється магнітне поле між конічними полюсними наконечниками. Зразок вісмуту повертається на нитці підвісу і встановлюється **поперек поля** (*б*). Тим самим демонструється виштовхування діамагнетика з зовнішнього поля.



Вимикають струм - і зразок повертається у вихідне положення.

Другий дослід - поведінка парамагнетика. Циліндрик магнію розміщується демонстратором **поперек поля** (поз. *a* на рис.2). Потім включається зовнішнє магнітне поле між конічними полюсними наконечниками. Зразок магнію повертається на нитці підвісу і встановлюється **вздовж поля** (*б*) і, більш того, притягується до найближчого до нього полюса магніту. Тим самим демонструється втягування парамагнетика в область зовнішнього поля.



Тим самим демонструється втягування парамагнетика в область зовнішнього поля.

Примітки. При опущеному поперечному демонстраційному столі магніт встановлюють на 2 великих, 1 малу підставки, проєкційний об'єктив - на середню, зворотну призму - на 2 середніх, 1 малу підставку.



Частина 4

КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

4.1. Гармонічні коливання. Рух тіні від кульки, що обертається

Прилади. На приставному демонстраційному столі виставляється відцентрова машина, на малому диску якої закріплений колінчастий тримач з кулькою на кінці (див. рис. 1). Проекційний ліхтар. Заслінка. Екран.

Дослід. Освітлюють кульку проекційним освітлювачем (наприклад, діапроектором «Світязь-Авто») так, щоб тінь від кульки потрапляла на екран. Піднімаючи або опускаючи заслінку, уникають попадання на екран непотрібних проекцій кріплення кульки і відцентрової машини. Повільно обертаючи ручку відцентрової машини, спостерігають на екрані зворотно-поступальні рухи - гармонічні коливання - кульки вздовж горизонтальної прямої.

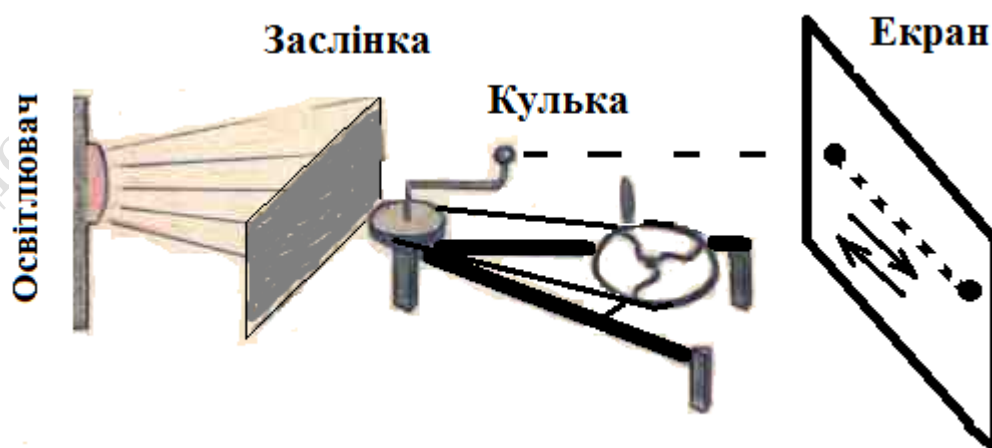


Рис.1.

Пояснення досліду. На рис. 2 наведено вид зверху на цю установку. Кулька, позначена літерою K , міститься на кінці радіуса OK . Будемо обертати радіус OK з кутовою швидкістю ω_0 проти годинникової стрілки і простежимо за рухом тіні від кульки K' на екрані. Якщо в початковий момент часу радіус OK був перпендикулярний екрану, то тінь від кульки перебувала в центрі екрана в точці O' . Через час t радіус повернеться на кут $\omega_0 t$. Якщо ж початковий кут відмінний від нуля і дорівнює α , то кут повороту буде дорівнювати $\omega_0 t + \alpha$. Позначимо довжину радіуса через A . Тоді проекція радіуса OK на вісь $O'x$ дорівнює

$$x = O'K' = A \sin(\omega_0 t + \alpha).$$

Тут через x ми позначили відхилення (зміщення) точки K' від положення рівноваги O' .

У міру обертання радіуса OK змінюється величина проекції, і точка K' буде здійснювати гармонічні коливання відносно точки O' - вліво, вправо і т.д. За один

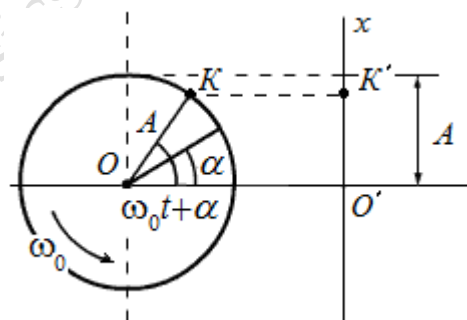


Рис. 2.

оборот точки K по колу її проекція зробить одне повне коливання і повернеться у вихідну точку.

4.2. Механічний запис коливань

Прилади. Запис коливань гілки камертона на папері здійснюється за допомогою приладу, зображеного на фото. Похила площина, кут нахилу якої регулюється. Візок, що з'їжджає на колесах по рейках з похилої площини. Камертон, закріплений на вершині похилої площини гілками паралельно похилій площині. До одній ніжці камертона прикріплений вузол, що записує. Молоточок. Аркуш паперу.

Дослід. Закріплюють папір на візку. Піднімають візок на вершину похилої площини і фіксують його положення спеціальною засувкою. Ударом молоточка змушують камертон звучати.

Спочатку записують слід гілки камертона за нерухомого візка. Отримують на папері пряму лінію.

Потім знову змушують звучати камертон. Натискають пускову кнопку, і візок з'їжджає з похилої площини під гілками камертона.

Вузол, що записує, залишає на папері, що лежить на візку, слід у вигляді синусоїди. Ступінь розтягнутості синусоїди змінюється від початку руху до його кінця.

Пояснення дослід. Під час руху візка вузол, що записує, буде перетинати пряму лінію, паралельну похилій площині, через однакові проміжки часу, рівні половині періоду. Оскільки візок рухається з прискоренням, шлях, що проходиться за рівні проміжки часу, зростає. Синусоїда розтягується в міру спуску візка.



4.3. Маятник пружинний

Прилади: штатив універсальний, набір пружин і вантажів, секундомір.

Дослід. Вертикальні пружні коливання демонструють, спостерігаючи залежність періоду коливань від маси вантажу і жорсткості пружини. Жорсткість змінюють, використовуючи різні пружини, а масу - різне число вантажів. Період коливань реєструють якісно, або за секундоміром.

Використовуються варіанти:

1. Однакові маси, різні пружини (жорсткості). Відмічають різні частоти.
2. Однакові жорсткості, різні маси. Частоти різні.
3. Однакові маси, однакові жорсткості, однакові частоти.
4. З'єднання послідовне пружинних маятників. Маса та ж, а період стає менше.

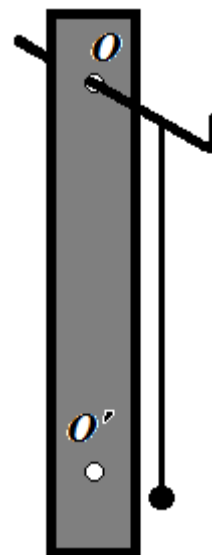
Отже, згідно з $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ жорсткості двох послідовно з'єднаних пружин додаються.



4.4. Фізичний маятник

Прилади: Дошка, на якій відзначені точка підвісу O і центр гойдання O' . Математичний маятник. Секундомір.

Дослід. Підвішують дошку в точці O на гак, вбитий поруч з аудиторною дошкою, потім знімають, перевертають і підвішують в точці O' . За допомогою секундоміра переконуються, що періоди коливань в обох випадках є однаковими. Відстань OO' - приведена довжина фізичного маятника. Поруч на тому ж стержні, вбитому в аудиторну дошку, підвішують математичний маятник з довжиною нитки, що дорівнює приведеній довжині. Обидва маятника гойдаються синхронно.

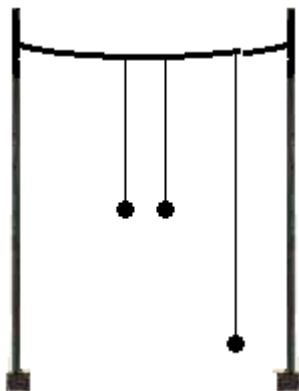


4.5. Зв'язані маятники

Прилади. Між двома вертикальними металевими стійками натягнута тонка мотузка. До неї підвішені 2 маятника однакової довжини і один з довшою ниткою підвісу.

Дослід. Спочатку відхиляють один з двох однакових маятників. Він збуджує коливання такого ж маятника, другий маятник поступово розгойдується. Амплі-

туда коливань першого маятника зменшується і, нарешті, перший маятник перестає колитися, а коливається тільки другий. Після цього картина повторюється в зворотному порядку. Довгий маятник при цьому ледь розгойдується.



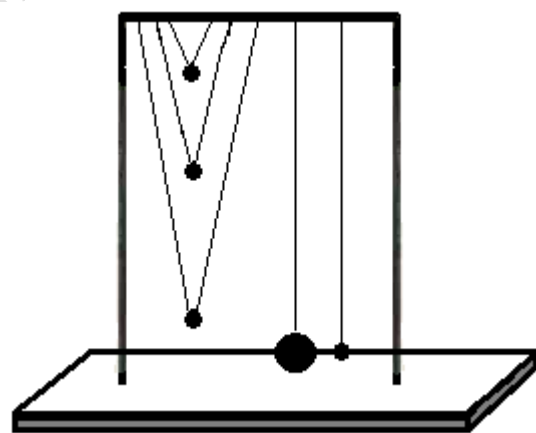
Потім відхиляють відразу два однакових маятника. Незабаром почне колитися довгий маятник. Довгий маятник періодично зупиняється і знову розгойдується. А два однакових маятника гойдаються без зупинки.

Пояснення досліду. Маятники можуть обмінюватися енергією («зв'язані системи»). Відбувається «перекачування» енергії від одного маятника до іншого. Взаємодія маятників здійснюється через їх підвіс і натягнуту мотузку. Воно носить резонансний характер. Відгукується другий маятник тієї ж довжини, що має ту ж власну частоту коливань.

Прилади. На дерев'яній стійці підвішені маятники: два маятника однакової довжини, але різних мас; три маятника однакової маси, але різних довжин.

Дослід. Переконаються, що математичні маятники однакової довжини, незалежно від маси кульок, коливаються синхронно. Зупиняють маятники.

Виводять маятник великої маси з положення рівноваги. Коливання цього маятника передадуться стійці, яка буде діяти на інші маятники з частотою, рівній частоті маятника великої маси. Розгойдуватися буде тільки маятник, довжина якого дорівнює довжині маятника з великою масою. Він знаходиться в резонансі. Решта маятники будуть розгойдуватися з дуже малою амплітудою. Їх частоти далекі від резонансної.



4.6. Вимушені коливання. Резонанс на пружинному маятнику

Прилади. Спеціальна установка з ексцентричною передачею. Вантаж на пружині. Ексцентриком служить штифт, укріплений на верхньому коліщатку мотузкової передачі на відстані половини радіуса від центра коліщатка. Під час обертання коліщатка штифт-ексцентрик (буквально - «прибитий не по центру») періодично піднімає горизонтальну нитку, впливаючи на точку підвісу пружинного маятника.

Дослід. Спочатку лектор пояснює пристрій експериментальної установки. Затискаючи пальцем однієї руки нитку на нерухомому блоці, відводять іншою рукою вниз від положення рівноваги пружинний маятник, відпускають його і вголос рахують частоту коливань.

Потім кажуть: «Якщо з такою ж частотою підштовхувати точку закріплення цього маятника, може наступити резонанс. Це можна зробити за допомогою мотузкової передачі з ексцентриком».

Демонстратор починає обертати ексцентрик **дуже повільно**, закликаючи всіх спостерігати за поведінкою пружинного маятника. Маятник практично не реагує на поштовхи.

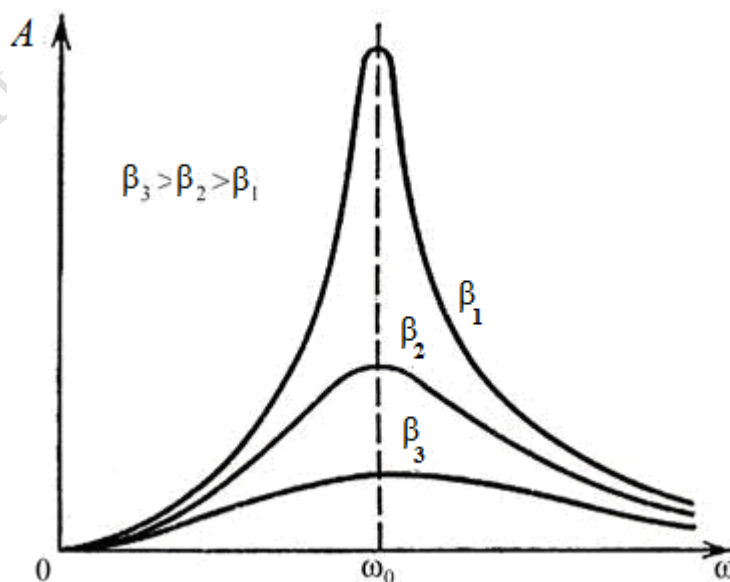
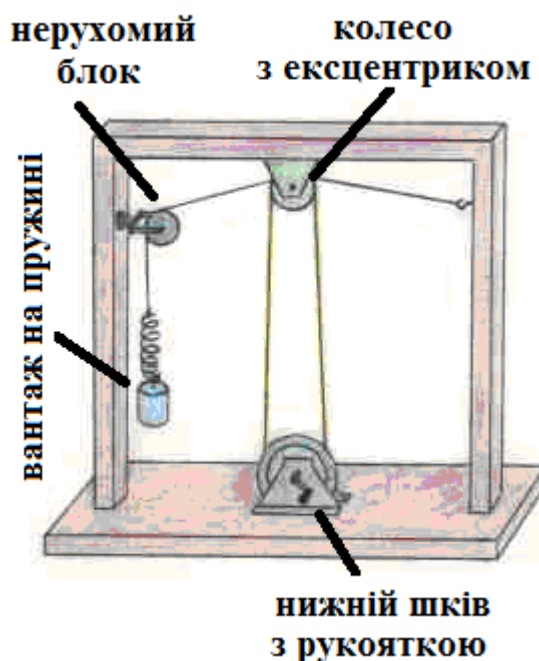
Потім навпаки, обертають нижній шків **дуже швидко**. Ефект той же.

Нарешті «ловлять» потрібну частоту підштовхування. Пружинний маятник сильно розгойдується, вантаж може зірватися з гуркотом - настає резонанс.

Корисна порада. Перед дослідом злегка змочується нитка передачі з ексцентриком.

Пояснення дослід.

Різка збільшення амплітуди вимушених коливань при наближенні частоти ω змушуючої сили до власної частоти ω_0 осцилятора називається **резонансом**. Як видно з ходу резонансної кривої відгук коливальної системи на періодичний зовнішній вплив досить малий для частот $\omega < \omega_0$ і $\omega > \omega_0$. Відгук різко зростає за $\omega \rightarrow \omega_0$.



4.7. Механічний резонанс. Резонатор Фрама

Прилади: резонатор Фрама; кодоскоп; екран.

Основним елементом резонатора Фрама є масивний металевий диск на осі, закріплений в металевому кільці так, що він може обертатися всередині кільця.

На краю диска просвердлений отвір. Це призводить при його обертанні до вібрацій з частотою, що збігається з частотою обертання диска.

На кільці встановлена обойма окремих резонаторів у вигляді пластинчастих пружин різної довжини (див. рис).

Дослід. Гіроскоп приводять в обертання за допомогою тонкого капронового шнура. Для цього один кінець шнура вставляють в отвір, який є в осі гіроскопа, і намотують шнур на вісь. Обхопивши лівою рукою кільце так, щоб диск не торкався долоні, правою різко висмикують шнур за його вільний кінець.

За допомогою проекційного апарату спостерігають в тіньовій проекції на екрані, як резонують ті чи інші пластинки. Коли пластинка резонує, її зображення стає розмитим.

Пояснення дослід. Після досягнення максимальної кутової швидкості обертання починається поступове гальмування диска.

При збігу власних частот коливань платівок з частотою змушуючих сил від незбалансованого диска окремі резонатори - пластинки починають інтенсивно коливатися. У міру зниження кутової швидкості обертання послідовно фіксуються моменти резонансу окремих пластинок.

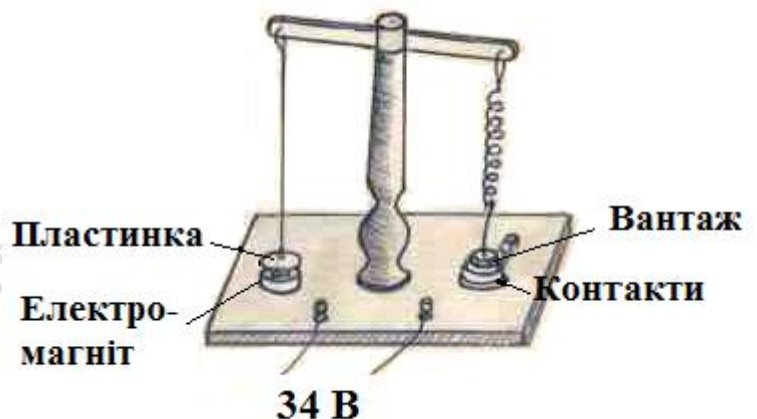


4.8. Автоколивання (коромисло)

Прилади: коромисло, на одному плечі якого знаходиться вантаж на пружині, який замикає контакти. З протилежного боку підвішена кругла залізна пластинка, що притягується до осердя електромагніта. Від випрямляча КЕФ встановлюють постійну напругу 34 В.

Дослід. Під дією вантажу контакти замкнуті. При проходженні струму осердя електромагніта намагнічується, пластинка притягується до нього, повертаючи коромисло і розриваючи контакти. Струм зникає і все повторюється спочатку. В результаті вантаж і пластинка здійснюють незгасаючі коливання.

Пояснення дослід. Незгасаючі коливання, за яких спад енергії автоматично поповнюється з будь-якого джерела енергії, називаються автоколиваннями. В даному досліді система працює за



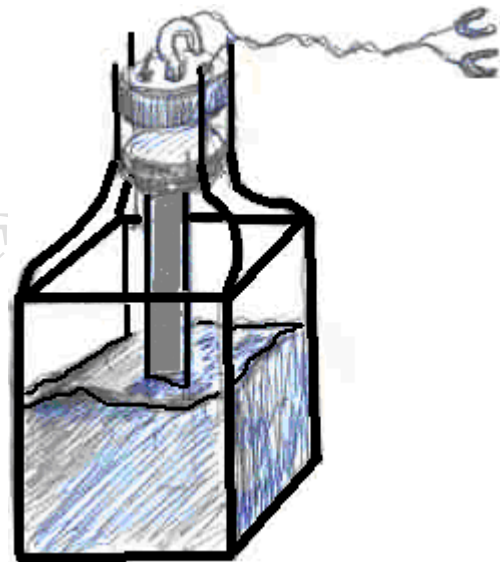
рахунок енергії джерела постійного струму. Зокрема, дослід демонструє принцип дії електричного дзвінка.

Примітка. Щоб уникнути залипання електромагніта між пластинкою і осердям електромагніта краще прокласти круглий листок паперу.

4.9. Автоколивання. Забивання палі

Прилади. У скляну чотиригранну посудину насипаний пісок. В пісок вертикально входить так звана «паля». Паля закінчується нагорі залізною площадкою. Зверху на цю площадку опускається електромагніт.

Дослід. Обмотку електромагніта з'єднують з виходом ЛАТРа. На виході встановлюють 25-30 В. Якщо через обмотку електромагніта пропускати змінний струм, то залізна площадка «палі» буде періодично притягатися до сердечника електромагніта і тому буде вібрувати. За рахунок таких вібрацій під дією ваги електромагніта «паля» поступово заходить в ґрунт.



4.10. Подвійний маятник (маятник Айрі). Додавання 2-х взаємно перпендикулярних коливань

Прилади. Подвійний маятник. Воронка. Стакан з просіяним піском. Картонка, обтягнута темним сукном.

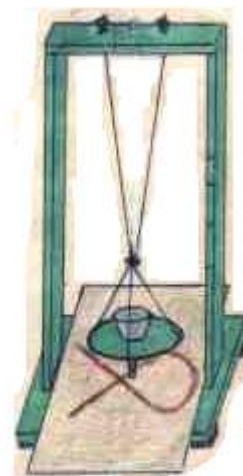
Верхня частина подвійного маятника завдяки двом підвісам може коливатися тільки в площині, перпендикулярній до стійок приладу (Демонстратор показує, як буде коливатися маятник).

Нижня частина, завдяки перетяжці, може коливатися як перпендикулярно до стійок, так і паралельно ним. (Демонстратор притримує на місці перетяжку і показує можливі рухи нижньої частини маятника). Нижня частина має меншу довжину. Отже, частоти обох коливань є різними.

Дослід. Якщо пускати маятник з кута площинки (картонки, обтягнутої чорним сукном) між стійками, то будуть здійснюватися і ті, і інші коливання одночасно. Струмок піску, що випливає з воронки, буде малювати траєкторію результуючого коливання.

Траєкторії називаються фігурами Ліссажу (показують заготовлену раніше фігуру, намальовану струменем піску на чорному тлі при відношенні частот 2: 3).

Якщо відношення частот є раціональним числом, фігура замкнута. Струшують і збирають пісок, б'ючи торцем площадки по листу ватману. Пісок про-



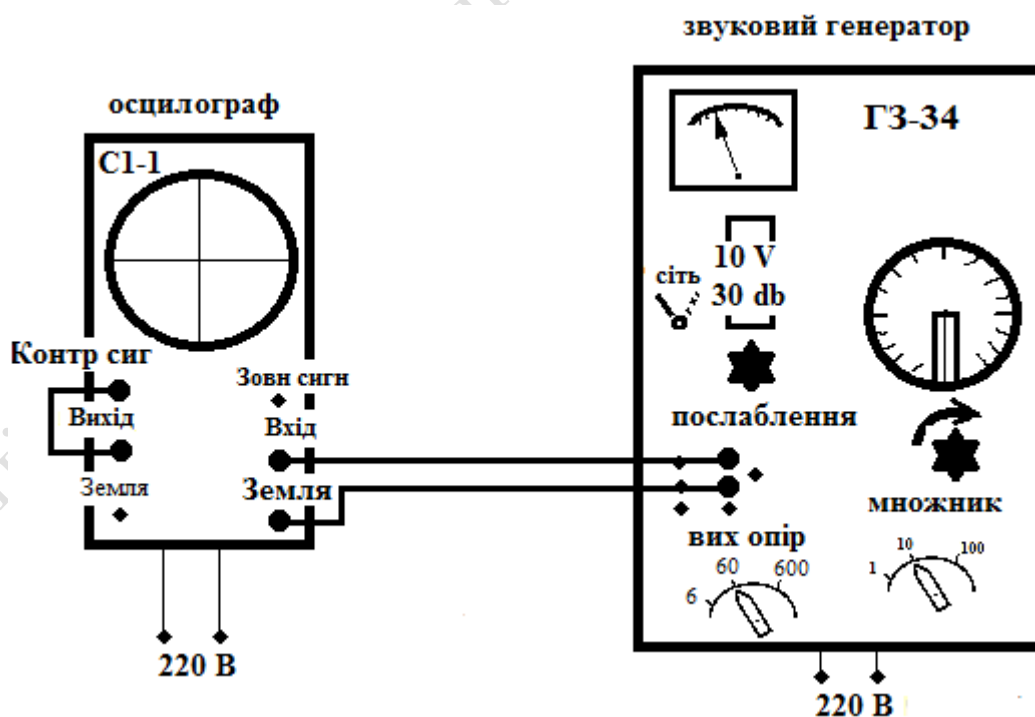
сіяння і дуже дрібний, його слід ретельно зібрати. Таким чином, пластинка очищена для нового малюнка. Встановлюють інше співвідношення частот, змінюючи положення перетяжки (на стійці відзначено, де повинна бути перетяжка для різних співвідношень частот) і пускають з кута пластинки між стійками воронку. Новий малюнок показують аудиторії.

Вказівка. Щоб картина, що отримується на пластинці, не псувалася при повторному ході маятника, слід насипати в воронку кількість піску, необхідну тільки для одного циклу руху.

Пояснення досліду див., наприклад, [1].

4.11. Фігури Ліссажу на екрані осцилографа

лади.
ратор
Осци-
граф
З'єд-
льні



При-
Гене-
ГЗ-34.
лог-
С1-1.
нува-
дроти.

Дослід. Додаються електричні взаємно перпендикулярні коливання. На пластини осцилографа, що відхиляють вертикально (по осі Y), подаються синусоїдальні коливання звукової частоти від генератора стандартних сигналів ГЗ-34.

На пластини осцилографа, що відхиляють горизонтально (по осі X) подається контрольний синусоїдальний сигнал з самого осцилографа частотою 50 Гц. Таким чином, частота коливань по осі X завжди 50 Гц, а по осі Y цілеспрямовано змінюється в досліді.

Ручки управління приладів знаходяться в наступних положеннях.

На осцилографі С1-1:

Діапазон частот - викл.

Синхронізація -внутрішня.

Ослаблення - 1: 100

Посилення: по X -2, по Y - 6,5.

На звуковому генераторі ГЗ-34:

Шкала приладу x2,

Множник x1,

Вих опір - 600,

Розстроювання - 0,
Регулювання виходу 0,6 (за шкалою зліва),
Межі шкал Ослаблення 10 V, 30 dB

При зміні частоти генератора електронний промінь виписує на екрані осцилографа різні фігури Ліссажу.

При подачі від звукового генератора сигналу частотою 50 Гц, співвідношення частот взаємно перпендикулярних сигналів, що складаються, становить 1:1, траєкторія - еліпс, коло, пряма. Перетворення цих фігур одна в одну пояснюється тим, що частоти коливань, що додаються, можуть дуже незначно відрізнятися. Тоді різниця фаз коливань, що додаються, не буде залишатися постійною, а буде безперервно дуже незначно змінюватися в межах від 0 до 2π . При цьому еліпс вироджується в пряму, окружність, знову в пряму і т.д.

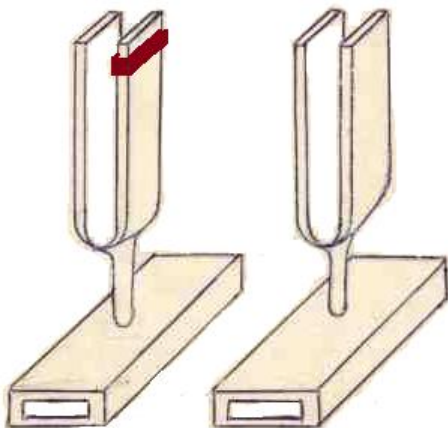
Далі, відповідно: при подачі сигналу частотою 100 Гц співвідношення частот стає рівним 1: 2, 150 Гц - 1: 3, 75 Гц - 2: 3, 25 Гц - 2: 1, 16,7 Гц - 3: 1, 33, 3 Гц - 3: 2, 66,7 Гц - 3: 4, 37,5 Гц - 4: 3 і т.д.

4.12. Камертони. Додавання коливань. Биття

Прилади: два однакових камертони, молоточок з гумовою прокладкою.

Дослід. Молоточком вдаряють по кожному камертону окремо. Вони звучать мелодійно і однаково. Повідомляємо аудиторії: так звучить нота «до» першої октави. Частота 256 Гц.

1. Можна показати передачу енергії акустичної хвилею і акустичний резонанс. Для цього резонаторні ящики направляють назустріч один одному отворами, на невеликій відстані. Вдаряють по одному камертону. Потім долонею гасять коливання того камертона, по якому вдарили. Чутно, як звучить другий. Щоб переконатися в цьому, гасять, накриваючи долонею, і другий. Звук явно зникає.



2. Тепер демонструють биття. На ніжку одного камертона одягають тягарець. Це додаткова маса, яка зменшує частоту коливань ($\nu = \sqrt{\frac{k}{m}}$). Знову змушують звучати обидва камертони. Тепер частоти камертонів злегка відрізняються. При додаванні отримується звукова хвиля з модульованою амплітудою. Виникають биття. Частота биття - це різниця частот коливань, що додаються.

Дослід повторюють кілька разів, починають з положення «насадка внизу», кожен раз пересуваючи насадку знизу вгору на деяку відстань. Коли насадка виявиться приблизно в середині ніжки камертона, биття стають чітко чутними.

4.13. Утворення біжучого хвильового імпульсу на гумовому шлангу. Стоячі хвилі на гумовому шлангу

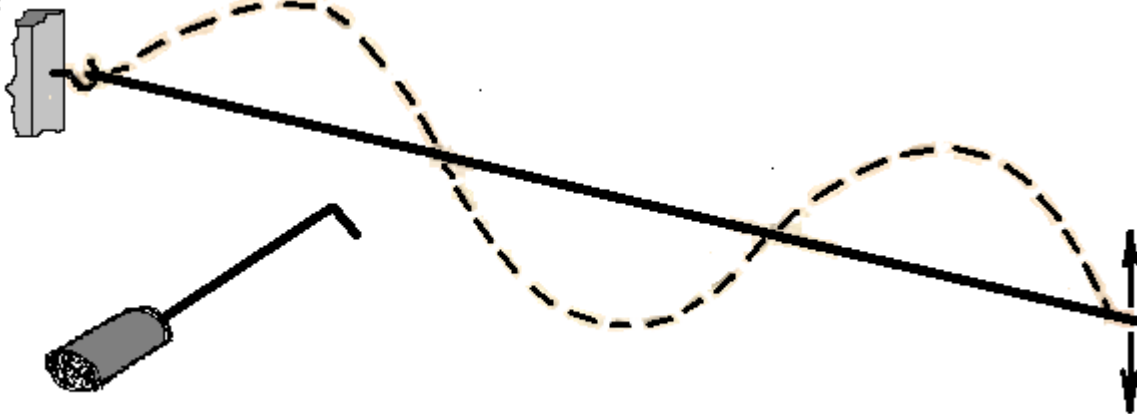
Прилади: гумовий шнур довжиною 4 - 6 м, анкерний гачок, закріплений в лутці вхідних дверей в аудиторію, залізний стрижень з дерев'яною ручкою, котрим опускають дошку в аудиторії.

Дослід. Шнур, прив'язаний одним кінцем до гачка, дозволяє демонструвати окремих поперечний імпульс, який біжить по шнуру, відбивання імпульсу, а також стоячу хвилю.

Для отримання *окремого імпульсу* шнур злегка натягують однією рукою і різко вдаряють один раз по ньому металевим стрижнем (наприклад, гачком для опускання дошки) поряд з рукою, що тримає його. Від місця удару біжить пружний імпульс. Від закріпленого на двері кінця шнура біжить відбитий імпульс. Лектор звертає увагу на втрату півхвилі при відбиванні, тобто відставання відбитої хвилі від біжучої за фазою на 180° .

Для отримання *стоячої хвилі* демонстратор бере шнур за неприв'язаний кінець, злегка натягує і приводить у коливання у вертикальній площині, злегка підкручуючи, як дитячу скакалку. Змінюючи частоту коливань руки і натяг шнура, можна отримувати різні стоячі хвилі - з однією пучністю посередині «скакалки», з одним або двома вузлами між рукою і гачком в двері і т.д.

У досліді наочно показано зв'язок між довжиною хвилі і частотою коливань.



4.14. Хвилі на поверхні води. Спостереження інтерференції хвиль від двох когерентних джерел

Прилади. Установка для вивчення хвильових явищ на поверхні води. Екран.

Дослід.



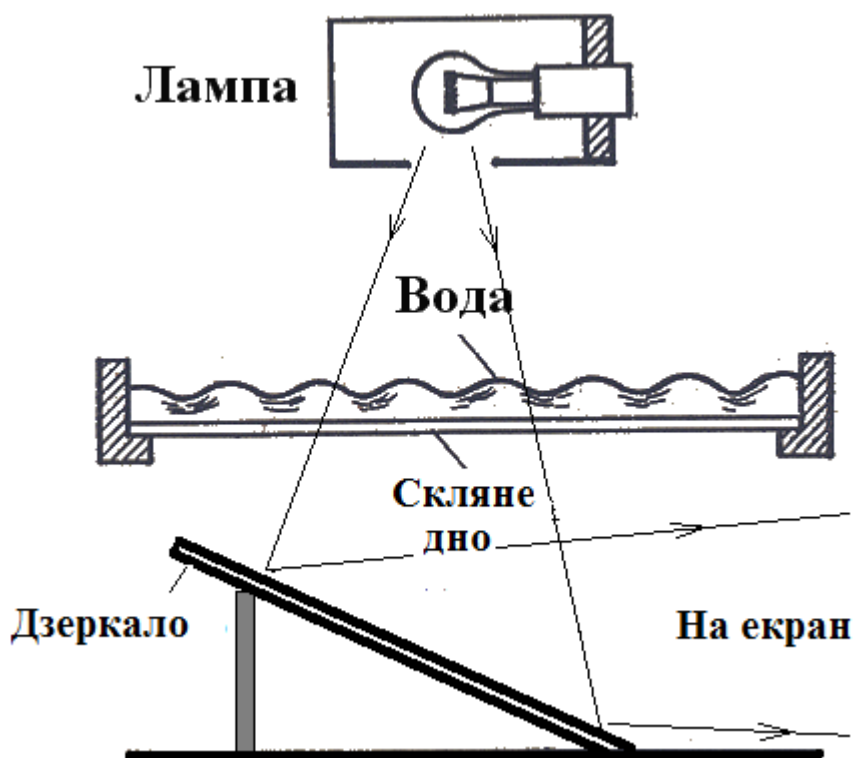
Наливають воду в плоску ванночку (кювету) з прозорим скляним дном. Закріплюють на наконечнику двигуна насадку з двома стриженьками, які будуть одночасно торкатися поверхні води.

Таким чином, через кожен точку поверхні води будуть проходити хвилі від двох когерентних джерел.

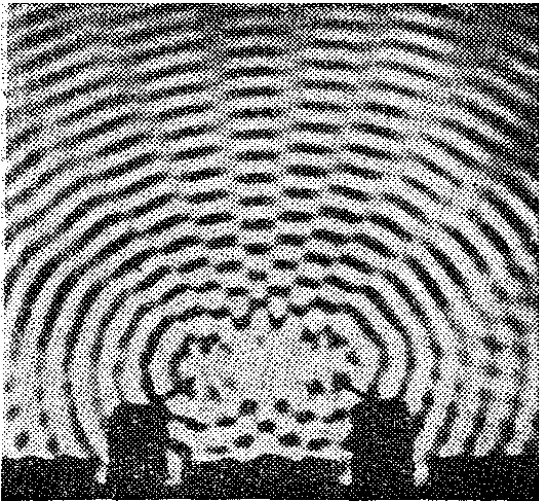
Висвітлюють ці хвилі лампою, розташованою зверху над кюветою. Світло, проходячи товщу води, потрапляє на дзеркало, розміщене знизу під кюветою, а від нього на екран. На екрані виникає тіньова картина хвиль, що рухається.

Пояснення досліду. Картину біжучих хвиль можна зробити *застиглою*, нерухомою. Якщо спалахи лампи будуть слідувати через проміжок часу, за який кожен гребінь переміститься в положення, яке займав гребінь, що передував в момент попереднього спалаху, тобто точно через період хвилі, то при кожному спалаху ми будемо бачити одну і ту ж картину - як би нерухому (таку, що зупинилася, застигла) хвильову картину.

Такий метод спостереження рухомих предметів називається *стробоскопічним*. В даній установці частота пе-



ривань світлового потоку збігається з частотою коливань вібратора, який збуджує хвилі.



Що відбувається, коли хвилі від двох джерел перекриваються?

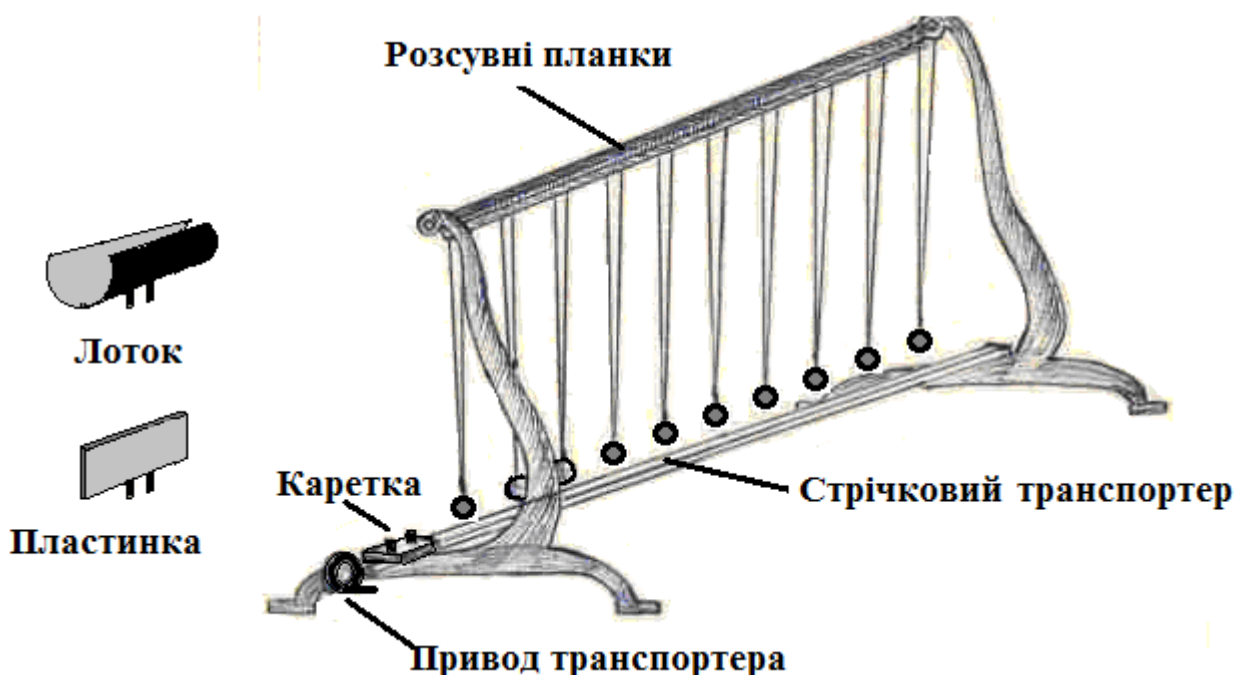
Там, де перетинаються два гребеня, повинен утворитися «подвоєний гребінь». На екрані хвильової кювети подібні «подвоєні гребені» повинні утворювати яскраві ділянки.

Там, де гребінь від одного джерела перетинає западину від іншого, вода залишається практично не збудженою і на екрані виходить сіре зображення. Нарешті, там, де перетинаються дві западини, на екрані утворюються найтемніші місця.

На сірих ділянках гребені весь час розміщуються над западинами і поверхня води тут є гладкою, не хвилястою. Ці лінії незбудженої води, що симетрично розходяться (вузлові лінії), видно на екрані.

4.15. Модель біжучої пружної хвилі - поздовжньої і поперечної. (Хвильова машина Е. Маха)

Прилади. Машина Е. Маха - механічна модель виникнення та розповсюдження хвиль. Кульки на біфілярних підвісах, які дозволяють кулькам коливатися тільки в одному напрямку - або уздовж, або поперек «біжучої хвилі». Варіант підвісу можна змінювати, розмикаючи або змикаючи планки, до яких прикріплені нитки кульок. Бавовняна стрічка транспортера приводиться в рух шківом з ручкою. На стрічці переміщається каретка, в яку вставляють або лоток, або пластинку.



Дослід. Якщо планки зімкнути, а в каретку вставити пластинку, то при обертанні ручки шківів і протягуванні каретки пластинка змушує кульки гойдатися поперек транспортера і виникає картина поперечної хвилі.

Якщо планки розімкнути (при цьому біфілярний підвіс дозволяє кулькам коливатися тільки уздовж транспортера), і в каретку вставити лоток з жолобом, то при протягуванні лотка кожна кулька заходить в жолоб, а потім зісковзує з нього вздовж ланцюжка кульок.

У ланцюжку кульок виникає картина згущень і розріджень, що біжать - картина поперечної хвилі.

Пояснення досліду. У цій моделі, як в реальній хвилі, за рахунок протягування транспортером джерела коливань штучно створюється одне з головних властивостей біжучої хвилі - відставання за фазою коливань наступних кульок, що імітують частинки середовища.

Вказівка. Щоб стрічка не прослизала при обертанні шківів, її можна злегка змочити ваткою по всій довжині перед дослідом.

4.16. Межа чутності звуків

Прилади. Звуковий генератор ГЗ-34, підсилювач 10 УП 2 -100 -102 «Електроакустика», змонтований в ближній до вікна частини демонстраційного столу, 4 звукові колонки на стінах великої фізичної аудиторії.

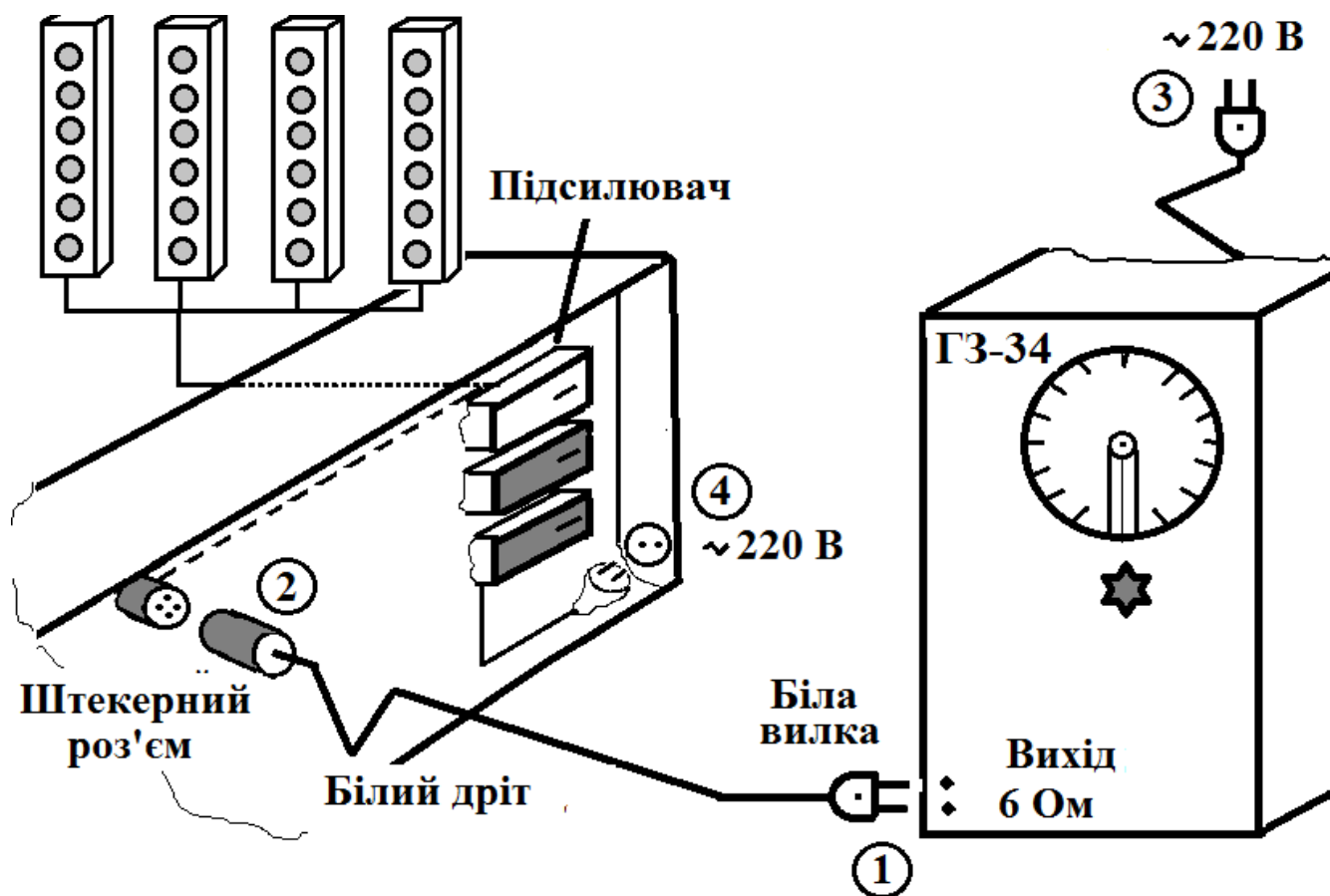
Дослід.

Перед початком досліду подають напругу на розетку ~ 220 В в нижній частині демонстраційного столу натисненням білої кнопки автоматичного вимикача на щитку праворуч від входних дверей з демонстраторської кімнати 2/33 в лекційну аудиторію 2/30.

Позначення на рисунку і послідовність операцій:

- 1 З'єднання звукового генератора з підсилювачем. Включення спеціального дроту білого кольору і білої вилки в звуковий генератор ГЗ-34.
- 2 З'єднання роз'єму під кришкою демонстраційного столу приблизно в його середині. Вставляють штекерну частину роз'єму у відповідну частину.
- 3 Включення звукового генератора ГЗ-34 в мережу змінного струму ~ 220 В в розетку в ніші «вікна» між аудиторіями 33/30, після чого тумблером «Мережа».
- 4 Включення підсилювача в мережу змінного струму ~ 220 В в розетку, змонтовану на ближній до вікна внутрішній стороні демонстраційного столу в низу.

Одночасно включають два нижніх ящика підсилювача за допомогою тумблерів на них.



На звуковому генераторі встановлюють:

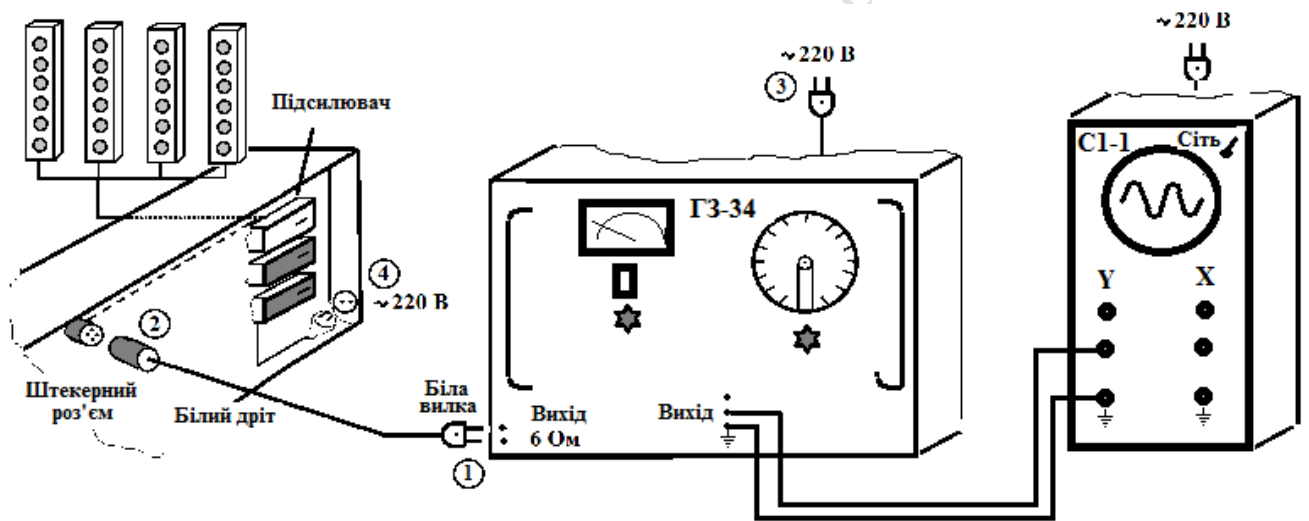
Шкала приладу X 2,
 Межі шкал 10 В, 30 dB,
 Вихідний опір - 60,
 Множник X 1, X10, ...
 Розлад 0.

5. У динаміках з'являється звук низької частоти. Обертаючи ручку «Частота Hz» під шкалою частот звукового генератора, повільно збільшують частоту звучання звукових колонок. Коли шкала частот закінчується, переходять на наступну шкалу, збільшену в 10 разів. Так доходять до частоти, яка як тонкий писк не сприймається вухом.

4.17. Аналіз звукових коливань за допомогою осцилографа

Прилади: звуковий генератор ГЗ-34, підсилювач 10 УП 2 - 100 -102 «Електроакустика», змонтований в ближній до вікна частини демонстраційного столу, 4 звукові колонки на стінах великої фізичної аудиторії, осцилограф С1-1.

Дослід. Порядок включення приладів той самий, що в досліді 4.16. Потім з виходу звукового генератора сигнал подається на вхід «Y» осцилографа. Спостерігається синусоїда, яка змінює форму в залежності від частоти звуку, чутного з динаміків.



Установчі дані:

ГЗ-34:

Шкала приладу X 2,
Межі шкал 10 В, 30 dB,
Вихідний опір-60 Ω,
Множник X 1, X10, X100 ...
Розлад 0.

С1-1:

Діапазон частот - 7.
Синхронізація -внутрішня.
Амплітуда синхронізації - 10.
Частота плавно - 7,4.
Ослаблення - 1: 100
Посилення: по X - 1,5, по У - 1.

4.18. Явище Доплера в акустиці

Дослід. Демонстратор ударом молоточка змушує звучати один з камертонів на резонаторному ящику.

Потім береться рукою за резонаторний ящик камертона, повертаючи його отвором до аудиторії.

Витягнувши прямо руку і ставши боком до аудиторії, демонстратор починає робити махи камертоном у напрямку до рядів слухачів і назад. Частота махів приблизно 1 мах в секунду. Слухачі повинні почути періодичні зміни висоти тону звуку - явище Доплера.

Зауваження. Дослід вимагає значних зусиль, тому в жіночому виконанні краще не показувати.

Електромагнітні коливання

4.19. Затухаючі коливання в коливальному контурі

Прилади. Спеціальний пристрій - демонстраційний електричний коливальний контур, що складається з котушки індуктивності з залізним осердям, що виймається, повітряного конденсатора змінної ємності і декадного магазину опорів. Осцилограф С1-1.

Дослід. З'єднують клеми «Y» і «Земля» на панелі коливального контура з відповідними клеммами на лицьовій частині осцилографа. Клема «X» з'єднується з гніздом «X» в задній частині осцилографа. Установкою зазначених нижче параметрів осцилографа домагаються на екрані осцилографа картини загасаючої синусоїди.

Установчі параметри осцилографа.

Амплітуда синхрон. -
нуль.

Діапазон частот 130.

Частота плавно 8.

Ослаблення 1:10

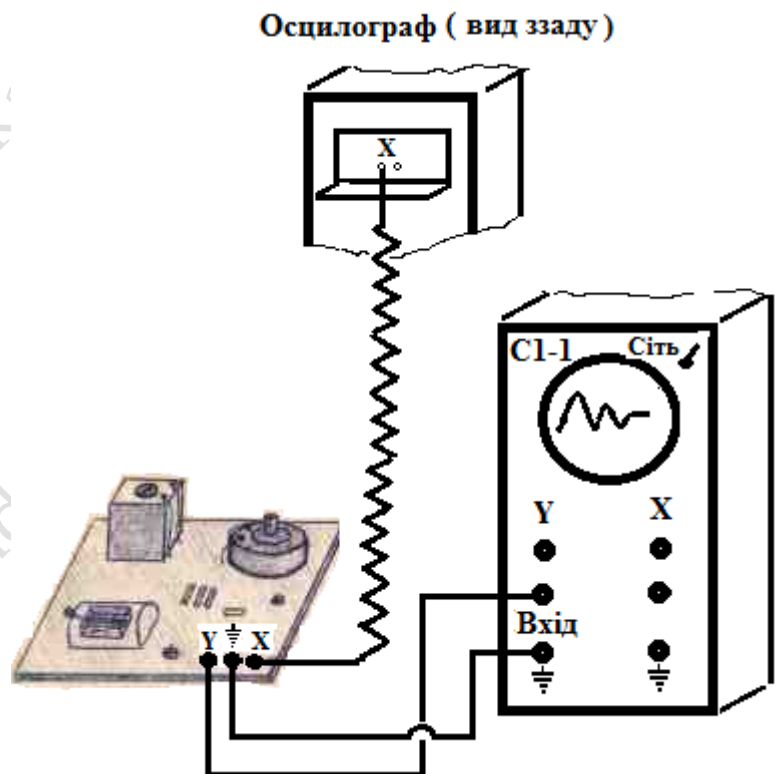
Посилення 1,5.

Синхрон. - внутр.

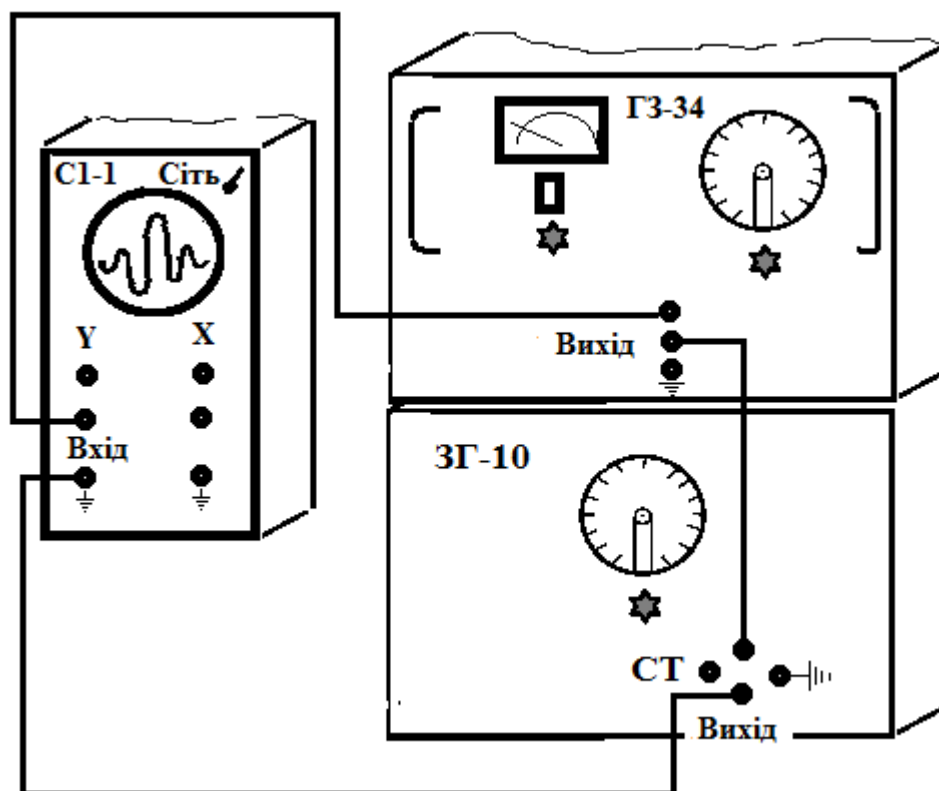
Посилення по X - 1.5

Посилення по Y - 1.5

Далі досліджують вплив кожного з параметрів на швидкість загасання. Слухачі стежать за тим, як демонстратор змінює по черзі всі три параметри: L (виймаючи і вставляючи осердя в котушку), C (повертаючи ручку конденсатора змінної ємності) і R (набором на декадному реостаті різних опорів). При цьому спостерігають за зміною виду загасаючої синусоїди.



4.20. Биття електричних сигналів на осцилографі



Прилади: осцилографи С1-1, генератор ГЗ-34, генератор ЗГ-10.

Дослід. Збирають схему згідно з малюнком. Складаються електричні коливання одного напрямку і близьких звукових частот. Коливання створюються двома генераторами і подаються на осцилограф. На екрані спостерігають результат додавання коливань - биття.

Установчі дані на приладах.

На осцилографі: ослаблення - 1: 100, діапазон частот - 7, частота синхрон. - 5, частота плавно - 3, синхрон. - внутр, посилення по Х - 7,6, посилення по У - 7.5.

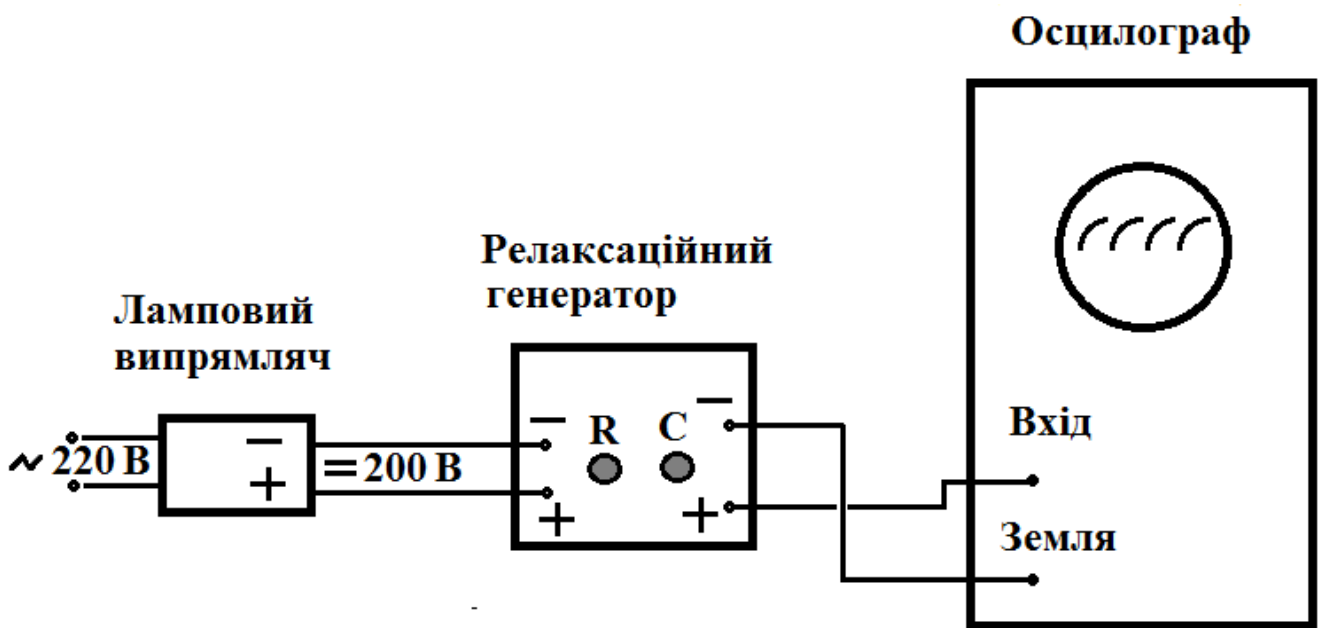
На генераторі ГЗ-34: шкала приладу - вольти $\times 2$, множник $\times 10$, частота - 60 - 62 Гц, розладження - 0, вих. опір - 60 Ω , регул. виходу напр. по вольтметру - 0.4 В, внутр навантаж. - викл, межі шкал-10 V, 30 dB.

На генераторі ЗГ-10: множник $\times 10$, частота - 1,5 поділки шкали, вих. опір - 50 Ω , регул. виходу за вольтметром - 50-60, внутр. навантаж. - викл, ручки «Затух. dB» не перемикаєти.

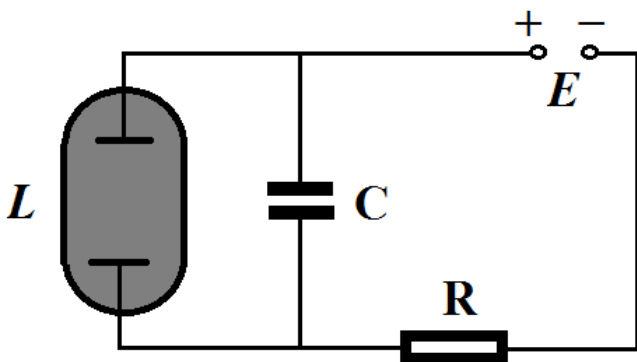
4.21. Релаксаційні коливання в схемі з неоновією лампою

Прилади: ламповий випрямляч - джерело постійної високої напруги, генератор релаксаційних коливань, осцилограф.

Дослід. Збирають схему згідно з рисунком.



Установчі дані на осцилографі: Ослаблення 1: 100, Діапазон частот 30; Частота плавно 0; Посилення по Y -1, по X - 3; амплітуда синхронізації -4, Синхронізація внутрішня.



Картину на осцилографі можна змінювати за допомогою регулювальних ручок R і C на генераторі

Пояснення досліду. Релаксаційні коливання - це автоколивання, для яких характерне поступове накопичення енергії, а потім швидкий її спад.

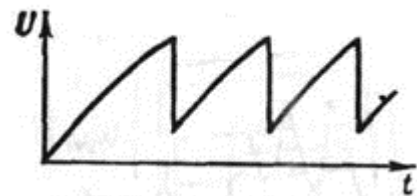
Тому такі коливання «скидання» за формою різко відрізняються від гармонічних коливань.

чних коливань.

Релаксаційні коливання в даному досліді виникають в схемі з неоновією лампою (див. рис.), яка має властивість запалюватися при певній напрузі U_z і гаснути при більш низькій напрузі U_r . Неонова лампа L включена паралельно конденсатору. У цій схемі періодично здійснюється зарядження конденсатора C від джерела струму E через опір R до напруги запалювання лампи, після чого лампа запалюється.

При цьому внутрішній опір неоновієї лампи стрибком стає малим і через неї починає проходити струм. Конденсатор швидко розряджається через лампу до напруги гасіння лампи. У цей момент лампа гасне, і процес зарядження конденсатора починається знову.

Форму кривих коливань напруги на конденсаторі показують на осцилографі.



4.22. Трансформатор Н. Тесли

Прилади: трансформатор Н. Тесли, газорозрядні трубки, неонова лампа, люмінесцентна лампа.

Дослід. Збирають трансформатор, для чого виносять на демонстраційний стіл підставу трансформатора з укріпленням на ньому першим контуром, вставляють в гніздо вторинну котушку. При цьому в те саме гніздо вставляється т.зв. «противагу» - шматок дроту, другий кінець якого вільно падає на підлогу аудиторії.

Затіняють аудиторію. Включають прилад в мережу ~ 220 В через розетку на столі. Лунає характерний тріск і навколо верхнього кінця вторинної котушки виникає коронний розряд.

Демонструють світіння безелектродних трубок, заповнених неоном і воднем. Безелектродні трубки поміщають в високочастотне поле трансформатора Тесли і спостерігають їх світіння. Потім спостерігають світіння трубок з електродами і світіння неонових ламп. Люмінесцентна лампа світиться в руках демонстратора. Ватка, змочена в ефірі (спирті), і піднесена до кульки вторинної котушки, загоряється.

Пояснення досліду.

Трансформатор Н. Тесли є резонансним трансформатором, який виробляє високу напругу високої частоти. Він заснований на використанні резонансних стоячих електромагнітних хвиль в котушках.

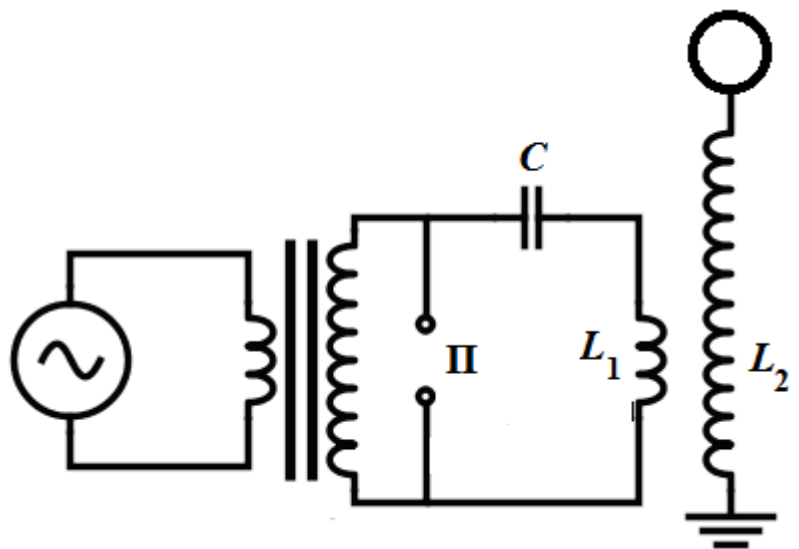
Його первинна обмотка L_1 має невелику кількість витків і входить до складу іскрового коливального контура, що містить конденсатор C і іскровий проміжок Π . вторинної обмоткою служить пряма котушка L_2 .

Первинна обмотка зазвичай містить всього декілька витків мідного дроту великого перетину, а вторинна - близько 1000 витків дроту меншого перетину.

Первинна котушка разом з конденсатором утворює коливальний контур, в який включений розрядник Π . Газовий розрядник являє собою два масивних електрода з регульованим зазором.

Трансформатор Тесли, показаний на схемі, працює в імпульсному режимі. *Перша фаза* - це заряджання конденсатора C до напруги проббою розрядника Π .

Друга фаза - генерація високочастотних коливань в первинному контурі. Дуга в розряднику - хороший провідник, тому конденсатор C і котушка L_1 виявляються з'єднаними, утворюючи коливальний контур і в ньому виникають високочастотні коливання.

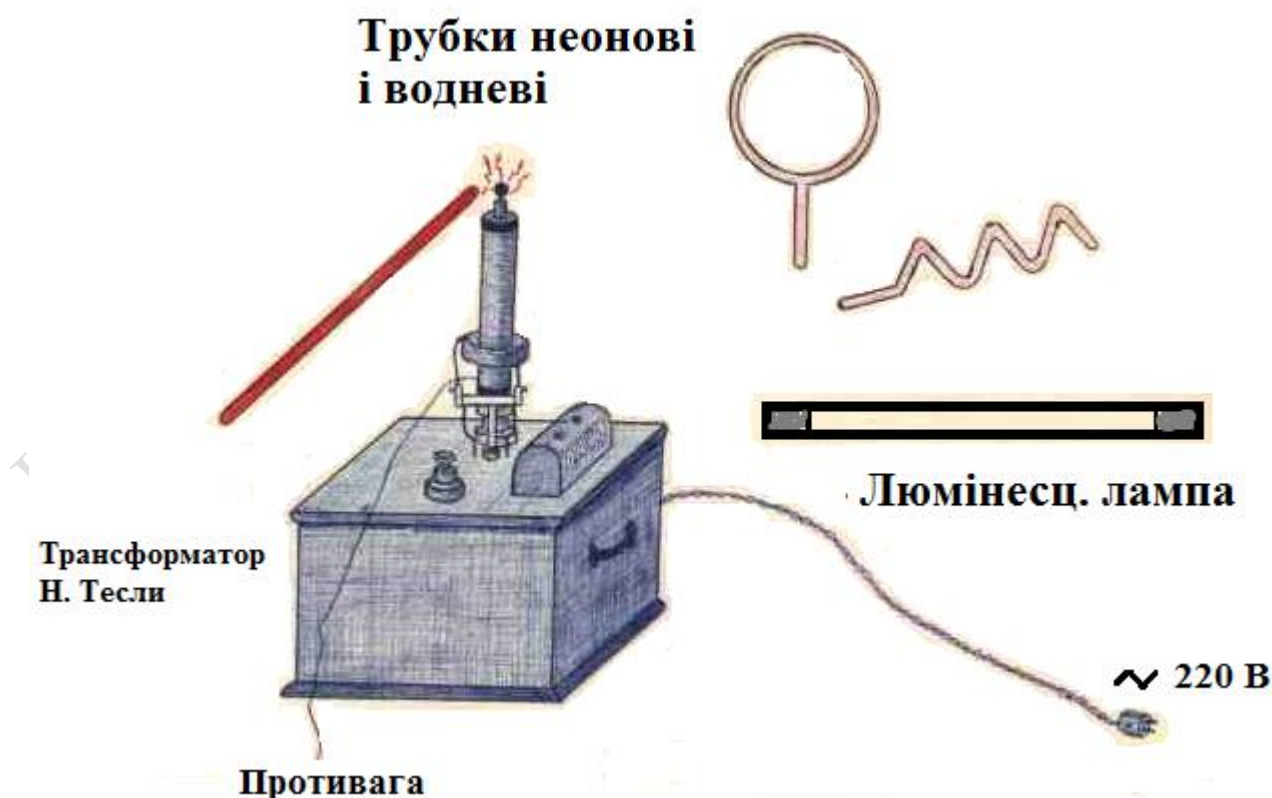


Крім того, замикаючи джерело живлення (трансформатор), розрядник виключає його з контура, інакше джерело живлення вносить втрати в первинний контур.

Завдяки енергії, яка містилася в конденсаторі, в цьому контурі відбуваються коливання. Під час цих коливань, конденсатор і котушка обмінюються енергією, частина якої розсіюється у вигляді тепла в обмотці L_1 , а частина створює світлошумові ефекти в розряднику.

Вторинна котушка L_2 також утворює коливальний контур, де роль конденсатора виконує власна міжвиткова ємність самої котушки.

Первинна і вторинна обмотки розміщені поруч і тому, між ними існує індуктивний зв'язок: коливання струму в первинній обмотці збуджують ЕРС і струм у вторинній обмотці.

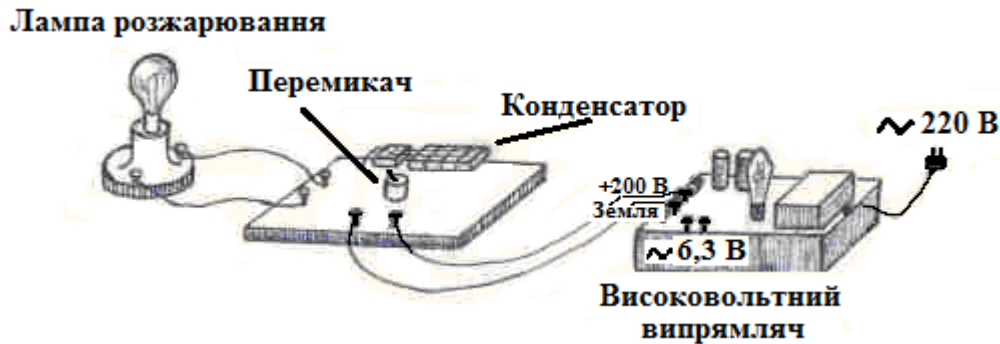


При збігу частоти коливань коливального контура первинної обмотки з частотою одного з власних коливань (стоячих хвиль) вторинної обмотки внаслідок явища резонансу у вторинній обмотці виникне стояча електромагнітна хвиля і між кінцями котушки з'явиться висока змінна напруга.

Таким чином, трансформатор Тесли являє собою два зв'язаних коливальних контури, що і визначає його чудові властивості і є головною його відмінністю від звичайних трансформаторів. Для повноцінної роботи трансформатора ці два коливальних контури повинні бути налаштовані на одну резонансну частоту.

Під час резонансу з кінців вторинної котушки можна витягувати довгі іскри, а електричне поле поблизу котушки є настільки сильним, що викликає світіння газорозрядних трубок.

4.23. Конденсатор в колі змінного струму. Струм зміщення



Прилади: ламповий високовольтний випрямляч, панель з укріпленою на ній батареєю конденсаторів і перемикачем, лампа розжарювання на підставці, з'єднувальні дроти.

Дослід. Збирають схему, як зазначено на рисунку. Оголошують аудиторії: «Лампа розжарювання, розрахована на 220 В, включена **в коло постійного струму послідовно з конденсатором**. Живлення лампи здійснюється від випрямляча, який дає 200 В, але постійної напруги».

Потім включають випрямляч в мережу 220 В. Лампа на мить спалахує і гасне. Це природно, тому що постійний струм через конденсатор не проходить, і лампа не світиться.

Оголошують аудиторії: «Перемикаємо напрямок постійного струму через конденсатор і лампу» (клацають перемикачем на панелі приладів). Лампа знову на мить спалахує.

Оголошують аудиторії: «Знову змінимо напрямок струму через конденсатор і лампу» (клацають так, щоб бачили всі, перемикачем на панелі приладів). Лампа знову на мить спалахує.

Вимикають високовольтний випрямляч з розетки ≈ 220 В, закорочують ізольованим дротом клема + 200 В і - 200 В. Від'єднують панель від випрямляча.

За допомогою сполучних проводів включають панель з батареєю конденсаторів і лампою розжарювання в розетку ≈ 220 В. Лампа, що включена послідовно з батареєю конденсаторів, горить безперервно. Оголошують: «Конденсатор в колі змінного струму не є розривом кола».

Пояснення досліду. У момент вмикання або перемикання струму відбувається зарядка і розрядка конденсатора. При цьому заряди натікають на обкладки конденсатора і стікають з них, не проникаючи всередину конденсатора. Струм, що проходить крізь лампу під час перезарядки конденсатора, нагріває нитку лампи.

Щоб спростити розрахунки, Максвелл ввів поняття «струму зміщення», що нібито проходить через конденсатор і є продовженням справжнього струму провідності в підвідних елементах. По суті, струм зміщення - це змінне електричне поле, яке реально існує між обкладками конденсатора.

Примітка. Після відключення від освітлювальної мережі високовольтного випрямляча не можна братися за клеми на ньому і розбирати коло. Це небезпечно! Може бути електричний удар!

Спочатку необхідно вимкнути випрямляч з розетки, потім вичікувати деякий час, чим довше, тим краще, та закоротити ізольованим проводом клеми на виході випрямляча і тим самим розрядити його конденсатор. Тільки після цього можна розбирати схему.

4.24. Стоячі електромагнітні хвилі в двопровідній лінії (система Лехера)

Прилади. Двопровідна система Лехера (дроти натягнуті поперек великої фізичної аудиторії поруч з дошкою). Ламповий генератор незатухаючих коливань (укріплений на стіні аудиторії). Каретки з лампою розжарювання і неонову лампою.

Дослід. 1. Подається напруга на генератор системи Лехера (включається автоматичний вимикач в демонстраційній аудиторії 2/33) ,.

2. Ставляться на дроти дві каретки-повзунка - з неонову лампочкою і лампочкою розжарювання.

3. Включається тумблером на стіні генератор.

4. За допомогою спеціальної указки з гачком по черзі повільно перетягують каретки уздовж двопровідної лінії. Тягнути слід строго паралельно проводам. Якщо тягнути неохайно і швидко, можливі перекося кареток, їх заклинювання і падіння. Відзначають будь-яким способом (наприклад, крейдою на дошці) місця загоряння лампочок. Підраховують довжину біжучої хвилі, яка дорівнює подвоєній відстані між сусідніми максимумами загоряння лампочок ($\lambda \approx 2,4 \text{ м}$ X $2 \approx 4,8 \text{ м}$).

5. Лектор повідомляє аудиторії частоту генератора $\nu = 62 \text{ МГц}$ і пропонує знайти швидкість електромагнітної хвилі. .

$$c = \lambda \nu = 4,8 \cdot 62 \cdot 10^6 = 2,976 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Пояснення досліду. Якщо в деякій області вільного простору збудити змінне електричне поле, то, відповідно до теорії Максвелла, в цій області виникає змінне магнітне поле, яке в свою чергу породжує змінне вихрове електричне поле, і т.д. Ці взаємопов'язані електричні і магнітні поля утворюють єдине електромагнітне поле, що поширюється в вакуумі зі швидкістю $\approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Від способу збудження електромагнітних хвиль залежить форма хвильового фронту і хвильових поверхонь. У найпростішому випадку хвильовий фронт - площа, і хвиля поширюється в одному напрямку.

Структура плоскої хвилі не зміниться, якщо у вільному просторі, в якому вона поширюється, помістити дві ідеально провідні площини, що є перпендикулярними вектору E . Поле між площинами залишиться таким самим поперечним, як і у вільному просторі (рис. 1, а).

Можна зробити деформацію цих площин так, як показано на рис. 1, б і 1, в. В результаті площини перетворяться в нескінченні циліндри, а поперечний характер електромагнітного поля при цьому збережеться.

Система двох паралельних провідних циліндрів утворює *двопровідну лінію*. У проводах лінії виникають змінні струми провідності, які замикають лінії струмів зміщення, які збігаються з лініями електромагнітного поля, що існує в просторі поза проводів.

Два мідні дроти діаметром $\approx 1,8$ мм натягнуті поперек аудиторії біля демонстраційного столу. Відстань між дротами 10 - 15 см і довжина ≈ 9 м.

Дроти прикріплені до стін аудиторії антенними ізоляторами. Такі дроти називають *системою Лехера*.

Біля початку системи поміщений генератор УКХ діапазону (зберігся ще ламповий), частота якого 62 МГц. Коливальний контур генератора індуктивно пов'язаний з лехеровою системою.

Якщо лінія замкнена на кінці провідним містком, то відбувається відбивання електромагнітних хвиль. Відбиті хвилі, складаючись з падаючою хвилею, створюють *стоячі електромагнітні хвилі*.

Якщо лінія на кінці коротко замкнена, то напруга на кінці лінії буде завжди дорівнювати нулю, тобто електричне поле там буде відсутнє. У опорі, що закорочує лінію, буде найбільша амплітуда струму і найбільше магнітне поле. Отже, в провідному містку утворюється пучність струму. Тут же буде і пучність магнітного поля.

Електричне поле у відбитій хвилі змінює фазу на π , тобто на кінці утворюється вузол напруги і напруженості електричного поля.

Якщо в біжучій хвилі вектори E і H змінюються синфазно, то в стоячій електромагнітній хвилі **вузли електричного поля (напруги) збігаються з пучностями магнітного поля (струму) і навпаки.**

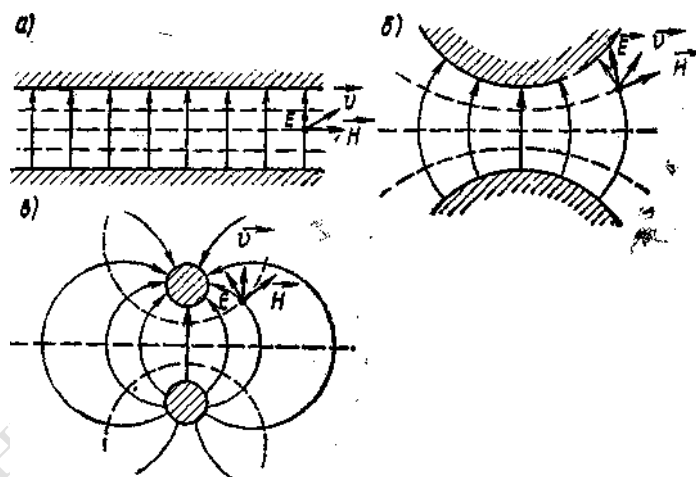
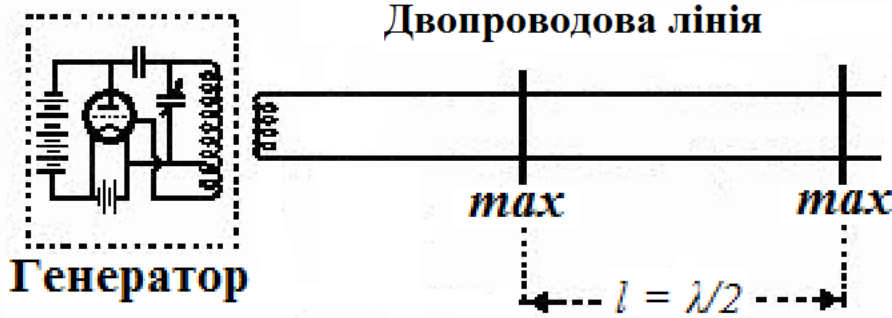
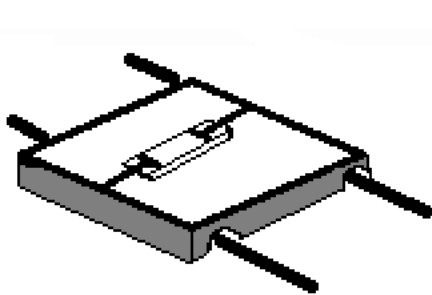


Рис. 1.

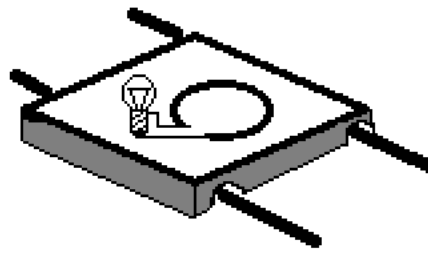
Для виявлення коливань електричного і магнітного полів користуються спеціальними каретками-повзунками, які можуть переміщатися уздовж лінії. На



одній з кареток укріплений **петлевий зонд**, що реагує на магнітну складову електромагнітного поля. Це замкнений дротяний контур, розміщений в площині двопровідної лінії, в який включена лампочка розжарювання. У пучностях магнітного поля в контурі виникає ЕРС індукції і лампочка



неонова лампочка



петлевий зонд

загоряється.

На іншій каретці укріплена **неонова лампочка**, включена між проводами. Вона спалахує в місцях пучностей напруги, тобто електричного поля.

4.25. Властивості електромагнітних хвиль

Прилади (див. фото).

Генератор приладу (1 на рис.1) генерує радіохвилі сантиметрового діапазону і зібраний на електровакуумній лампі - відбивному клістріні, навантаження якого є прямокутний хвилевід.

Живлення генератора здійснюється від блоку живлення (2).

За допомогою рупорної антени отримують спрямований пучок електромагнітних хвиль.



Прийняті приймачем радіохвилі детектуються в постійний струм, напруга якого подається на вхід підсилювача (3), а від нього на гальванометр (4).

Стрілка гальванометра відхиляється пропорційно величині сигналу, що приходить.

Дослід. Включають клістронний генератор і прогрівують його протягом 2 - 3 хв. Встановлюють рупори передавальної і приймальної антен однієї проти одного на відстані 0,5 - 0,8 м. Регулятором напруги на аноді лампи домагаються максимального відхилення стрілки гальванометра.

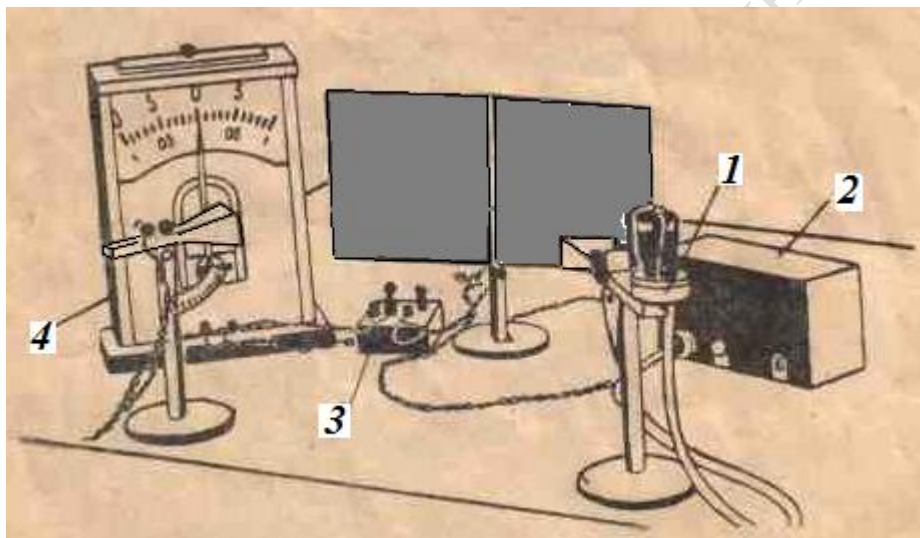


Рис. 1.

Дослід № 1. Демонстрація спрямованого випромінювання і спрямованого прийому електромагнітних хвиль.

Спостерігають виразний прийом електромагнітних хвиль. Повертаючи навколо вертикальної осі рупору антenu генератора, спостерігають спочатку ослаблення, а потім повне зникнення при-

йому по відхиленню стрілки гальванометра. Переконуються в тому, що прийом є спрямованим. Дослід повторюють і з антеною приймача.

Дослід № 2. Демонстрація екрануючої дії провідників

Включивши генератор, спостерігають виразний прийом випромінюваних ним електромагнітних хвиль. Повільно вносять між генератором і приймачем металевий екран (відбивач) і спостерігають поступове зменшення відхилення стрілки гальванометра. Коли екран повністю закrije рупор генератора, прийому не буде.

Повторюють дослід з екраном з ізолюючого матеріалу (лист скла, пластику і т.д.). Переконуються в тому, що він не викликає екрануючої дії.

Дослід № 3. Відбивання електромагнітних хвиль

Розміщують генератор і приймач так, щоб осі їх хвильоводів перетиналися в площині металевого листа (рис. 1). Спостерігають прийом електромагнітних хвиль. Забирають відбивач і переконуються, що прийому немає. Замінюють провідний екран ізолюючим і переконуються, що відбивання хвиль відбувається гірше.

Цим дослідом показано, що електромагнітні хвилі добре відбиваються від провідних і гірше від ізолюючих поверхонь.

Встановлюють антени генератора і приймача під кутом 30° від перпендикуляра до площини відбивача і спостерігають явище відбивання електромагнітних хвиль. Змінивши кут однієї з антен, переконуються, що прийому немає.

Повторюють дослід з кутами антен 45° , 60° .

На підставі досліду роблять висновок про те, що електромагнітні хвилі відбиваються за тим же принципом, що і хвилі світла: кут падіння дорівнює куту відбивання, причому напрямки падаючої і відбитої хвиль і нормалі до дзеркала лежать в одній площині.

Дослід № 4. Заломлення електромагнітних хвиль

Встановлюють рупори передавальної і приймальної антен один проти одного і спостерігають виразний прийом електромагнітних хвиль.

Вносять між рупорами трикутну призму з парафіну. Спостерігають припинення прийому. Зсунувши рупор приймача в сторону підстави призми, знаходять точку, в якій спостерігають впевнений прийом.

Дослід свідчить про те, що електромагнітні хвилі, проходячи через призму, заломлюються, відхиляючись від первинного напрямку в бік підстави призми.

Дослід № 5. Фокусування електромагнітних хвиль

Між рупорами встановлюють лінзу з парафіну. Відстань між рупорами генератора і приймача має бути рівним 140 - 160 см.

Лінзу необхідно поставити так, щоб рупор приймача опинився у фокусі лінзи. Включають генератор і переконуються, що прийом є.

Пересуваючи приймач по дузі постійного радіуса відносно лінзи, переконуються, що є одне положення, в якому величина відхилення стрілки є максимальною, а в інших положеннях вона різко зменшується. Забирають лінзу і, пересуваючи приймач по тій же дузі, переконуються, що відхилення стрілки не змінюється.

Дослід № 6. Спостереження поляризації електромагнітних хвиль

Випромінювані рупорної антеною електромагнітні хвилі є плоско поляризованими. Для аналізу площини їх поляризації використовується аналізатор (1 на рис.2), що складається з набору паралельних металевих дротів, орієнтацію яких можна змінювати

Встановлюють генератор і приймач на відстані 50 - 70 см, між ними розміщують поляризаційні решітки так, щоб провідники решітки були паралельними між собою і паралельними горизонтальній площині. Включають генератор і спостерігають прийом.

Потім одну з решіток повільно повертають до положення, перпендикулярного положенню другої решітки.

Спостерігають повільне зменшення відхилення стрілки гальванометра. При взаємно перпендикулярному положенні проводів решіток хвилі не проходять і сигнал не приймається.

Забирають одну з решіток та повторюють дослід. Переконуються, що хвилі, випромінювані генератором, є поляризованими.

Пояснення досліду. Коли дроти обох решіток є горизонтальними, то хвилі проходять через решітки, практично не послаблюючись.

Це відбувається тому, що електричне поле хвилі направлено перпендикулярно до дротів решіток і не викликає в них швидкозмінних струмів. Тому в решітках не відбувається ніяких електричних явищ і наявність решіток не проявляється.

Якщо ж повернути одну з решіток на 90° , то електромагнітні хвилі не проходять через решітки. В цьому випадку електричне поле хвилі є паралельним дротам і викликає в них сильні швидкозмінні струми. Тому решітка діє так само, як і металева пластина і електромагнітні хвилі від неї відбиваються.

Висновок. Електромагнітна хвиля, що йде з рупора, є поляризованою в вертикальній площині

Дослід № 7. Спостереження дифракції електромагнітних хвиль

Між генератором і приймачем, що знаходяться на відстані 50 - 70 см, поміщають вузьку ширму, що складається з двох смуг. Переміщують приймач по дузі постійного радіусу щодо осі ширми. Спостерігають прийом сигналів за ширмою. Дослід свідчить про «загинання» хвиль за краї ширми.

Вставляють ще дві смуги на контур решітки. Розсовують смуги так, щоб між ними утворилася щілина 3,5-4 см. Ширини щілин по всій довжині повинні бути однаковими (рис. 3). Повільно пересуваючи приймач по дузі навколо вузької ширми, спостерігають ділянки сильного відхилення стрілки гальванометра, розділені ділянками, де прийому майже немає. На середній ділянці величина відхилення є трохи більшою, ніж на сусідніх ділянках.

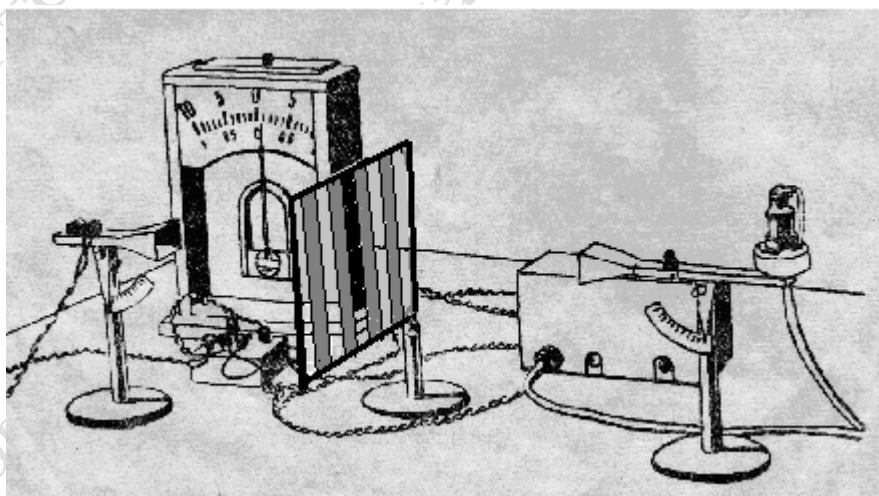


Рис. 3.

Зауваження. Необхідне розміщення приладів має бути зазначено на демонстраційному столі.

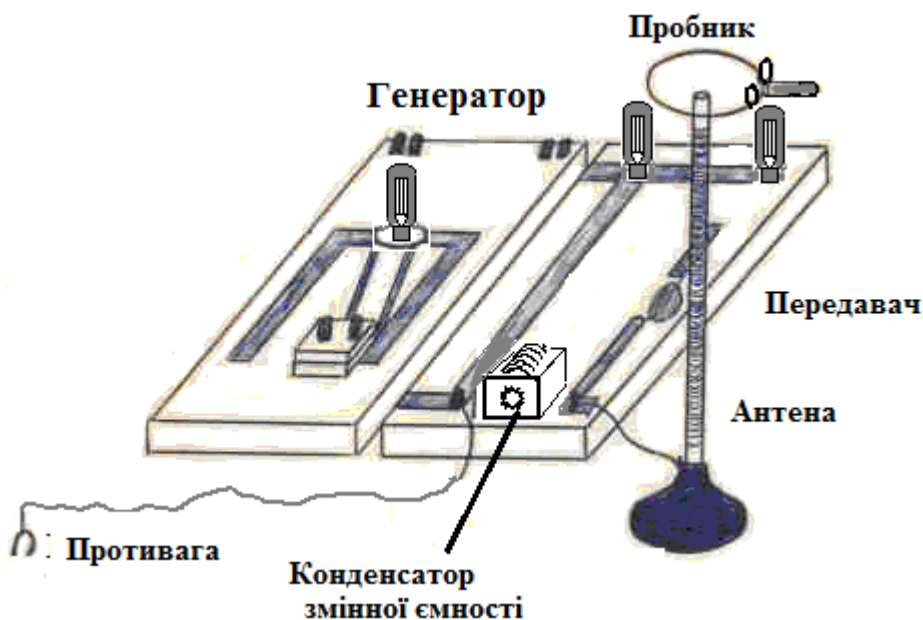
4.26. Стоячі електромагнітні хвилі

Прилади: генератор, передавач, антена, виконана у вигляді довгої котушки, намотаної в один шар на ізолюючому каркасі, пробник у вигляді дротяного кільця на ізолюючій ручці, лампа розжарювання і неонові лампи включені в коло пробника.

Дослід. Електромагнітні хвилі, поширюючись вздовж антени - котушки, відбиваються від її кінців і утворюють стоячі електромагнітні хвилі.

За допомогою спеціальних роз'ємів з'єднують генератор з передавачем. До передавача підключають антену - котушку. Включають схему в мережу ~ 220 В.

Пробник з лампами проносять зверху вниз уздовж антени і за допомогою конденсатора змінної ємності домагаються того, щоб у верхнього краю антени була пучність напруги, тобто загорілася неонева лампа. Опускаючи пробник вниз вздовж антени, спостерігають, що неонева лампа періодично спалахує. У тих місцях, де спалахує неонева лампа, існують пучності напруги електромагнітної стоячої хвилі. Між двома пучностями напруги знаходиться пучність струму - тут загоряється лампочка розжарювання.

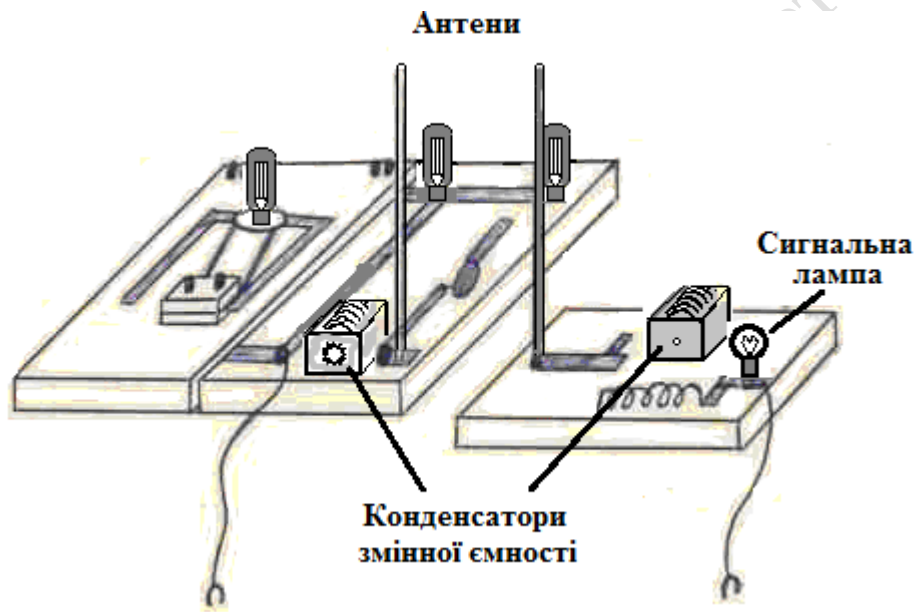


4.27. Передавання і прийом електромагнітних хвиль

Прилади: генератор, передавач, дві штирьових антени, прийомна панель з лампою розжарювання.

Дослід. За допомогою спеціальних гнізд і штирів з'єднують генератор і передавач. На передавачі і приймачі закріплюють антени і розташовують їх недалеко одна від одної паралельно. Включають в мережу. Потім за допомогою конденсаторів змінної ємності, встановлених на платах генератора і приймача, домагаються максимального світіння нитки лампочки, встановленої на платі приймача.

При віддаленні приймача прийнятий сигнал слабшає.



Національний

Дніпровська політехні

кафедра фізики

<http://physics.nmti.org.ua>

Частина 5

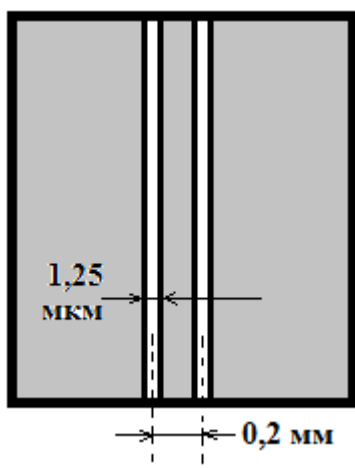
ХИЛЬОВА ОПТИКА

5.1. Інтерференція світла. Дослід Юнга

Прилади: блок лазерного випромінювача ($\lambda = 0,63$ мкм) з навчального приладу ЕСФЕ-1 «Оптика», блок лінз, подвійна щілина Юнга, екран.

Дослід. Т. Юнг - видатний англійський фізик, один з творців хвильової теорії світла. Йому належить термін «інтерференція світла» (1802).

Під час експерименту Юнга світло від Сонця падало на екран з вузькою щілиною, світло, що дифрагувало, йшло на другий екран з двома вузькими щілинами. Утворювалися два розбіжних пучка, які були когерентними з огляду на спільність походження. З використанням лазерів, що генерують когерентне світло, перша щілина в досліді Юнга виявилася не потрібною.



Блок лазерного випромінювача встановлюється на демонстраційному столі так, щоб лазерний пучок був направлений уздовж столу в сторону від спостерігачів.

Затемнюють аудиторію. Включають лазер. На механічній осі блоку лазерного випромінювача встановлюється блок лінз в положення 13 Ц (циліндрична лінза), завдяки чому отримують лінійне джерело світла. Встановлюють в лазерний пучок щілини Юнга (демонстраційний елемент 2.1 з інтерференційного набору), закріплюють їх на рейтері вертикально - паралельно лінійному джерелу світла. В кінці столу в напрямку лазерного пучка встановлюють відбиваючий екран. Отримують на екрані інтерференційну картину - типові паралельні інтерференційні смуги, які отримуються при накладенні двох пучків, що пройшли через обидві щілини і розширилися внаслідок дифракції.

Щілини Юнга в даному досліді являють собою дві вузьких паралельних щілини в непрозорому екрані, відстань між якими є набагато меншою відстані до екрану, $d \ll l$.

У приладі ЕСФЕ-1 щілини Юнга мають такі параметри (див. рис.):

$$d = 0,2 \text{ мм}, l \approx 1,5 - 2 \text{ м}.$$

Розрахунок показує, що для цих значень d і l відстань між інтерференційними смугами,

$$h \approx \frac{\lambda l}{d} = \frac{0,63 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 4,725 \text{ мм}.$$

яка добре спостерігається на екрані.



5.2. Інтерференція світла. Біпризма Френеля

Прилади: блок лазерного випромінювача ($\lambda = 0,63$ мкм) з навчального приладу ЕСФЕ-1 «Оптика», блок лінз, біпризма Френеля, рейтер, екран.

Дослід. Блок лазерного випромінювача встановлюється на демонстраційному столі так, щоб лазерний пучок був направлений уздовж столу в сторону від спостерігачів. Переносний екран, закріплений в рейтері, розміщують на протиле-



жному кінці демонстраційного столу перпендикулярно до осі падаючого пучка.

Затемнюють аудиторію. Включають лазер. На механічній осі блоку лазерного випромінювача повертають блок лінз в положення 13 Ц (циліндрична лінза Л1), внаслідок чого отримують лінійне джерело світла. На екрані спостерігають вертикальну щілину яскраво-червоного кольору.

Після цього на відстані 10-15 см від лазера встановлюють в рейтері розсіювальну лінзу Л9-2 з фокусною відстанню - 6 см (Л2) з набору лінз приладу «ЕС-ФЕ-1». Лінзу закріплюють так, щоб вертикальна світна щілина проектувалася на оптичний центр лінзи. При цьому розміри поперечного перетину пучка на екрані істотно збільшуються.

Нарешті, на відстані ≈ 25 см від лазера в рейтері ставиться біпризма Френеля, заломлююче ребро якої встановлюється теж вертикально.

Утворена на екрані інтерференційна картина має вигляд вертикальних світлих і темних смуг (червоного кольору).

Переносний екран орієнтують так, щоб пучок ковзав вздовж його поверхні. При цьому картина інтерференції «розтягується» на екрані і стає краще видимою.

5.3. Інтерференція світла в тонких плівках. Мильний клин

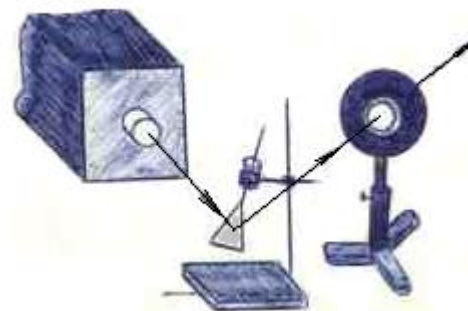
Прилади: проекційний апарат «Світязь-Авто», дротяний трикутний каркас на штативі, проекційний об'єктив для отримання зображення плівки на екрані, обертова призма, екран, стакан з мильним розчином.

Дослід слід проводити в затемненій аудиторії. Дротяний трикутник закріплюють в штативі у вертикальній площині. Переміщаючи проекційний об'єктив, отримують різке зображення дротяного каркасу на екрані. Посудину з мильним розчином підводять до трикутника знизу і піднімають його так, щоб трикутник зтягнувся плівкою. Забирають посудину.

Плівку проектують на екран у відбитому світлі. Об'єктив встановлюють на шляху світлового пучка, відбитого від мильної плівки.

За допомогою об'єктива отримують на екрані чітке зображення мильної плівки з кольоровими смугами.

Однак зображення є перевернутим. Тоді ставлять ще обертову призму. Картина інтерференції являє собою ряд горизонтальних кольорових смуг, які поступово переміщуються вниз.



Кольори інтерференції з'являються перш за все у верхній частині плівки, оскільки внаслідок стікання рідини ця частина стає тоншою.

Пояснення досліду. Промені, відбиті від двох поверхонь тонкої плівки, будуть когерентним, можуть інтерферувати. З умови максимумів інтерференції слід, що для різних довжин хвиль максимуми будуть спостерігатися за різної товщини мильного клина, зростаючої донизу дротяного каркасу (смуги рівної товщини). Інтерференційні смуги будуть зміщуватися вниз по мірі стоншення плівки через стікання рідини.

Перед тим, як плівка лопне, її верхня частина стає чорною. Коли товщина плівки прагне до нуля, оптична різниця ходу променів виникає тільки за рахунок різних умов відбивання: один промінь відбивається від оптично більш густого середовища, фаза хвилі змінюється на π , інший - від оптично менш густого, зміни фази не відбувається. В результаті між променями виникає різниця фаз, що дорівнює π , і вони гасять один одного. У відбитому світлі плівка буде чорною.

Примітка. Успіх досліду залежить також від якості мильного розчину. Найкраще використовувати звичайне господарське мило. 100 г мила нарізають тонкими стружками і заливають водою на 6-8 годин. Потім, помішуючи, доливають склянку води і отримують густий і прозорий розчин. Можна використовувати розчин шампуню 3-5% концентрації.

5.4. Інтерференція світла в тонких плівках. Застиглі тверді плівки

Прилади: проекційний апарат «Світязь-Авто», дротяні каркаси з застиглими тонкими плівками, проекційний об'єктив для отримання зображення плівки на екрані, екран.

Дослід демонструють точно за схемою досліду 5.3 з мильною плівкою, яку замінюють застиглими плівками. Для виготовлення застиглих плівок (див. [3]) використовують ацетон і клей (АК-20, АК-88) або лак для нігтів в співвідношенні 1:3. У кювету з водою поміщують круглий дротяний каркас діаметром 5-6 см з мідного дроту товщиною 1-1,5 мм зі спаяними кінцями, що утворюють ручку. Кінець ручки має бути відігнутий в площині, перпендикулярній до площини самого кільця, і виступати за межі судини.

На поверхню води (кип'яченої) наливають кілька крапель розчину (в залежності від площі судини і плівки, яку хочуть створити).

Коли розчинник повністю випарується, на плівці з'являються кольори інтерференції, і приблизно через 1 хв плівка застигає.

Підвівши кільце під плівку, його слід підняти і таким чином відокремити плівку від води. Краї плівки обрізають навколо кільця ножицями, а потім висушують в сушильній шафі при $t^{\circ} \approx 60^{\circ} \text{C}$ протягом 5-10 хв.

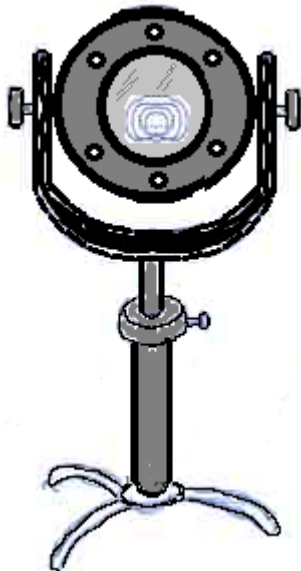
Щоб збільшити термін зберігання плівки, її доцільно закріпити на скляній пластинці розміром 45 x 60 мм. На промиту і протерту тампоном зі спиртом поверхню скла опускають з висоти 1-2 см кілька крапель розчину, який розтікається, утворюючи тонку плівку. Потім плівка висихає.

Ще один варіант виготовлення тонких поліетиленових плівок. Поліетилен розчиняють в теплому толуолі, після чого виливають на скляну пластинку. Після випаровування толуолу плівку відділяють водою.

5.5. Інтерференція світла. Кільця Ньютона. (Плоска і плоскоопукла скляні пластинки)

Прилади. Прилад на штативі для отримання і демонстрації кілець Ньютона, проєкційний апарат «Світязь-Авто», проєкційний об'єктив для отримання зображення кілець на екрані, екран.

Дослід. Схема досліду повністю аналогічна схемі досліду 5.3, в якій замість дротяного трикутника ставиться прилад для демонстрації кілець Ньютона. Явище спостерігають у відбитому світлі. Зворотню призму можна не ставити.



Будова приладу: в ньому стикаються дві скляні пластинки - плоска і плоскоопукла, між їх поверхнями утворюється повітряний клин. Пластинки укладені в оправу, обладнану гвинтами, які дозволяють плавно змінювати відстань між пластинками. За допомогою шести регулювальних гвинтів показують розширення або стиснення кілець при зближенні або віддаленні скляних пластинок. Дослід проводиться в затемненій аудиторії.

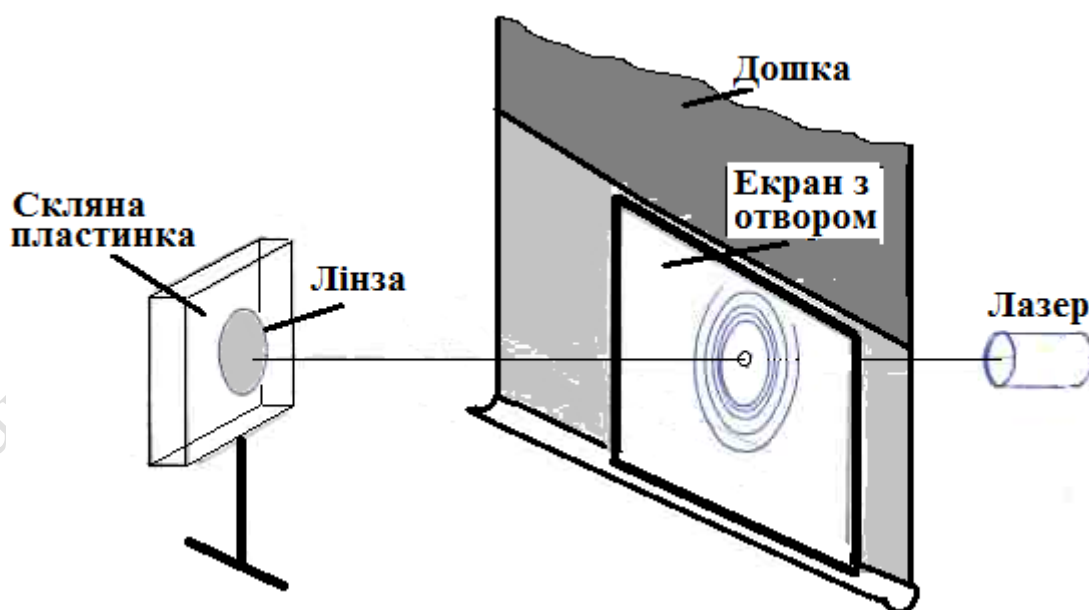
Пояснення досліду. Інтерференційні кільця є окремим випадком ліній рівної товщини. Інтерферують пучки світла, які відбиваються від двох поверхонь повітряного клина, що виник між плоскою скляною пластинкою і покладеною на неї плоскоопуклою скляною пластинкою.

Другий варіант досліду є простішим - спостереження ведуть в прохідному світлі. Прилад для демонстрації кілець Ньютона виймають з штатива і кладуть на предметний столик діaproектора «Полілюкс». На великий екран проєктують поверхню зіткнення пластинок приладу. Показують розширення, стиснення і пере-

міщення кілець Ньютона при зближенні або віддаленні скляних пластинок за допомогою регулювальних гвинтів.

5.6. Інтерференція світла. Кільця Ньютона. (Скляна пластинка і плоско-опукла лінза)

Прилади: Плоско-опукла лінза затиснута між двома плоско - паралельними скляними пластинками, гелій-неоновий лазер, переносний невеликий екран з білого ватманського паперу в дерев'яній рамці з малим отвором посередині екрану. Дослід проводять в затіненій аудиторії.



Дослід. Дослід створений доцентом А.І. Лютим.

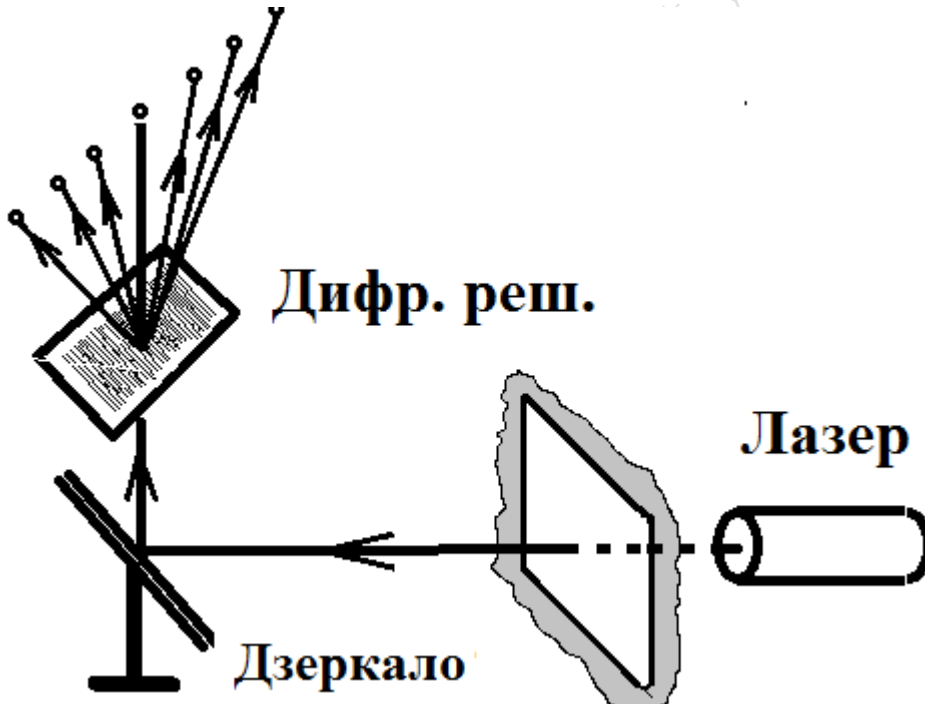
Переносний екран встановлюють в улоговину для крейди аудиторної дошки і опускають верхню дошку так, щоб вона підтримувала переносний екран і закривала всі непотрібні деталі обстановки. Промінь лазера, встановленого в демонстраційній аудиторії, пропускають через малий отвір в переносному екрані так, щоб він падав точно посередині встановленої на великому демонстраційному столі лінзи. Злегка переміщаючи пластинку з лінзою, домагаються того, щоб відбиті назад промені потрапляли на переносний екран. Навколо отвору в екрані з'являється інтерференційна картина, що має вигляд кільцевих смуг.

На екрані можна спостерігати багато яскраво видних концентричних кілець Ньютона.

5. 7. Дифракція лазерного світла на дифракційних ґратах

Прилади: гелій-неоновий лазер, що генерує світло на довжині хвилі $\lambda = 632,8$ нм (червона частина видимого спектру), поворотне дзеркало на підставці, набір дифракційних решіток. Дослід проводиться в затіненій аудиторії.

Мета досліду: спостереження дифракції монохроматичного світла на дифракційних ґратах і залежності положення дифракційних максимумів від періоду (сталого) дифракційної решітки.



Дослід. Світло від лазера, що стоїть в демонстраційній аудиторії, через «вікно» потрапляє в лекційну аудиторію на поворотне дзеркало, а від нього на стелю аудиторії (див. рис.). Слухачі спостерігають яскраву пляма на стелі.

Потім демонстратор ста-

вить на шляху світлового відбитого від дзеркала променя по черзі дифракційні решітки з різним числом штрихів на 1 мм.

На стелі спостерігається система дифракційних максимумів різного порядку. Легким обертанням решітки навколо променя показують, що центральна пляма залишається при цьому на місці. Лектор звертає увагу на зміну відстані між максимумами у дифракційних картинах при зміні періоду ґратки.

Ефектна картина променів, що дифрагували, спостерігається, якщо використовувати дим від сигарети, яким можна позначити хід променів.

Потім лектор повертає ґратку на 90° навколо променя. Тепер дифракційні плями йдуть не поперек стелі аудиторії, а вздовж неї. Впливає питання, адресоване слухачам. «А що буде спостерігатися, якщо накласти дві решітки одну на одну?» Відповідь завжди є правильною: «Періодична плоска система світлових плям».

Для досліду беруть дві однакові решітки. Показують спектри від кожної решітки окремо. Потім решітки накладають одну на одну, поступово повертаючи від паралельного напрямку щілин до перпендикулярного і спостерігають дифракцію.

Лектор: «Своєрідною дифракційною ґраткою є капронова тканина, волокна якої йдуть правильними рядами вздовж і впоперек». На шляху променя лазера

ставиться шматок капронової тканини. На стелі спостерігають дифракційний «хрест».

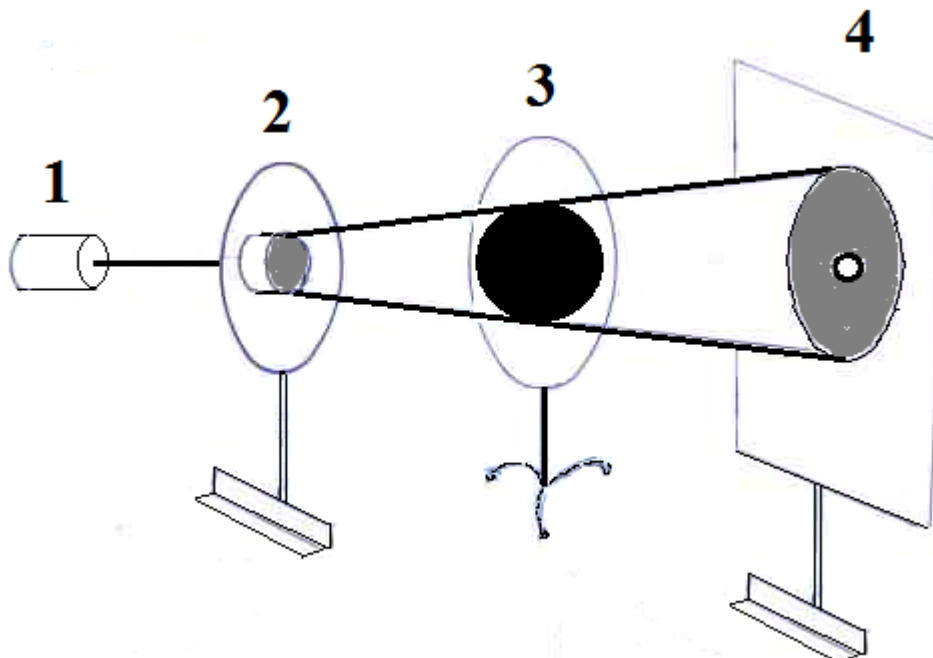
Нарешті, на шляху променя ставиться скло, покрите спеціальним чином густо нанесеними на нього розсіювальними частинками. Моделюється оптичний феномен в природі - «гало», світне кільце навколо джерела світла. Це дифракційне явище в природі викликано крижаними кристалами в хмарах.

Пояснення досліду. Дифракція на дифракційній ґратці пояснюється інтерференцією променів від різних щілин ґратки. Формула максимумів інтерференції $d \sin \varphi = k \lambda$, де d - період (стала) ґратки, φ - кут, під яким спостерігається максимум, k - порядок максимуму, λ - довжина хвилі світла. На підставі формули лектор пояснює, чому зі збільшенням числа штрихів на одиницю довжини (тобто зі зменшенням періоду ґратки) максимуми розходяться більше.

Вказівка. Лазер треба включити заздалегідь перед лекцією і закрити вихід променя чохлам.

5.8. Дифракція лазерного світла на круглому екрані. Пляма Пуассона

Прилади: He-Ne лазер (1), проєкційний об'єктив, який розширює лазерний пучок (2), прозора пластинка з укріпленою на ній кулькою (3), напівпрозорий екран з матованого скла (4). Дослід слід проводити в затемненій аудиторії.



Дослід створений доцентом А.І. Лютим.

Дослід: пучок світла від лазера, потрапляючи на проєкційний об'єктив, розширюється у вигляді вузького конуса, падає на пластинку з кулькою від підшипника. В результаті дифракції на кулі (тут вона грає роль круглої перешкоди) в центрі тіні від кулі

лі завжди буде світла пляма, яка називається плямою Пуассона. Спостереження ведуть з боку аудиторії, тінь і світлу пляму видно через напівпрозорий екран.

Пояснення досліду. Якщо між точковим джерелом світла і точкою спостереження помістити круглий диск, то він закриє кілька, наприклад, m центральних зон Френеля. Тоді амплітуда світла в центрі дифракційної картини буде дорівнювати

$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - \dots = \frac{A_{m+1}}{2} + \left(\frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2} \right) + \dots \approx \frac{A_{m+1}}{2}.$$

Таким чином, в центрі дифракційної картини при будь-якому m завжди отримується світла пляма, інтенсивність якої залежить від номера першої відкритої зони Френеля.

5.9. Дифракція на дифракційній ґратці в білому світлі

Прилади. Діапроектор «Пеленг» 500-А. Слайд зі щілиною. Набір дифракційних ґрат. Екран.

Дослід. Включають діапроектор в мережу. Переміщаючи об'єктив діапроектора за допомогою регульовального гвинта червоного кольору, домагаються різкого зображення на екрані вузької щілини від вставленого в проєктор слайда.

Потім перед об'єктивом проєктора поміщають дифракційну ґратку. Її тримають у руці так, щоб пучок світла, що виходить з об'єктива, по можливості повністю покривав ґратку. На екрані виходить зображення щілини, по обидва боки від якого (центральної білої смуги) розташовуються дифракційні смуги спектральних кольорів - максимуми 1-го, 2-го і так далі порядків, розділені неосвітленими проміжками.

Замінюють дифракційну ґратку іншою, з меншим періодом. Кількість спостережуваних порядків спектрів і ширина спостережуваних кольорових смуг спектрів залежить від числа штрихів на 1 мм ґратки. При зменшенні періоду ґратки смуги стають ширшими.

5.10. Дослід із зонною пластинкою

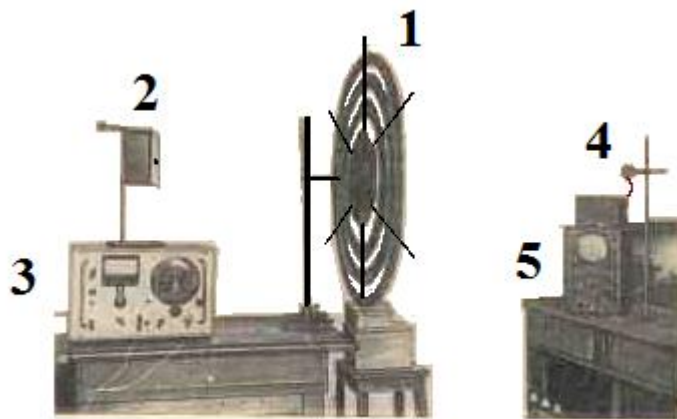
Прилади. Зонна пластинка для акустичних хвиль 1 складається з прозорих і непрозорих кілець, що послідовно чергуються. Діаметр всієї пластинки близько 90 см. Пластинка виготовлена з дротяного каркаса, парні зони закриті звуконепроникним матеріалом (оксамитом). Джерело звуку - електродинамічний випромінювач 2, що живиться струмом від звукового генератора ГЗ-34 (3). Випромінювач поміщений в дерев'яний ящик з внутрішньою звукоізоляцією. Вихідний отвір діаметром 1,5 см. Приймачем звуку є п'єзотелефон 4, сигнал від якого подається на осцилограф 5.

Дослід. Включають випромінювач звуку і приймач. На екрані осцилографа спостерігають синусоїду. Розміщують на підставці зонну пластинку між джерелом і приймачем звуку. Амплітуда синусоїдальних коливань зростає в 2-3 рази.

Пояснення дослід.

Зонною пластинкою називається екран, який перекриває всі зони Френеля однаковою парністю, Це призводить до збільшення інтенсивності сигналу, що приймається (див., наприклад, [1]).

Застосування зонних пластинок для світлових хвиль в умовах лекційних демонстрацій утруднено. Тому зонна пластинка створена для акустичних хвиль. Вибір закритих зон проводився з урахуванням того, що найбільша переконливість досліду буде в тому випадку, коли закрита центральна зона. Розрахунок радіусів зон проводився за відомими формулами. Дана зонна пластинка містить сім зон Френеля, перекриті парні зони, головна фокусна відстань пластинки $F = 100$ см. Під час експерименту використовуються звукові хвилі з частотою 9 кГц.



5.11. Поняття про спектральний аналіз. Демонстрація фотографії спектрів

Прилади: діaproектор «Полілюкс», фотопластинка з фотографіями спектрів. Дослід слід проводити в затемненій аудиторії.

Дослід. На великий екран проєктуються фотографії спектрів Zn, Cu і латуні. Вони розташовані спеціально поруч так, щоб видно було, які характерні лінії цинку і міді повторюються в спектрі латуні (цинк + мідь = латунь).

Потім окремо демонструється складний спектр заліза.

5.12. Голограма

Прилади: фотопластинка з голограмою, гелій-неоновий лазер, проєкційний об'єктив на підставці. Дослід слід проводити в затемненій аудиторії.

Дослід. Світло від He-Ne лазера, що стоїть в демонстраційній аудиторії, через «вікно» потрапляє на проєкційний об'єктив. Проєкційний об'єктив на підставці встановлюють на т.зв. «перпендикулярному» демонстраційному столі. Формується розбіжний лазерний пучок.

Демонстратор піднімається по середніх сходах аудиторії, тримаючи в руках голограму. Приблизно в середині підйому голограма повністю освітлюється розбіжним лазерним пучком.

Студентів запрошують по черзі заглянути в голограму з боку падаючого лазерного пучка. (При цьому треба намагатися не перекривати собою пучок світла).

Дивлячись в голограму, все бачать з іншого боку тривимірний об'єкт, що ніби висить у повітрі.

Пояснення досліду. Демонстрація заснована на явищі дифракції світла на двовимірній структурі, яка виникла в шарі фотоемulsії в результаті інтерферен-

ції двох когерентних світлових пучків: опорного і розсіяного предметом, зображення якого записувалося на голограмі на стадії її виготовлення.

Вказівка. Категорично неприпустимо орієнтувати лазер так, щоб його пряме світло мало можливість потрапити в очі присутніх в аудиторії.

(* 5.13. Поляризація світла при відбиванні від поверхні діелектрика

Прилади: Джерело світла - діaproектор ЛЕТІ-60 М. Мала оптична лава. Діафрагма. Збиральна лінза. Стопа Столетова. 2 чорних дзеркала - на низькій і високій підставках. Малий поляроїд. Модель поляризації світла при відбиванні.

Дослід. Дослід слід проводити в затемненій аудиторії.

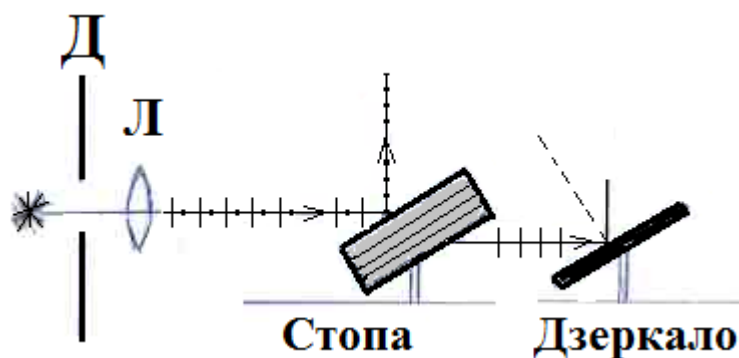
А). Чорне діелектричне дзеркало встановлюють на шляху світлового пучка. Відбитий промінь спрямовують на стелю або стіну аудиторії. Користуючись малим поляроїдом як аналізатором, досліджують відбитий промінь. Обертаючи поляроїд навколо променя, спостерігають зміну яскравості світлового потоку аж до гасіння променя. Це означає, що відбите від поверхні діелектрика світло є поляризованим.

Б) Якщо скласти до купи 8-10 скляних пластинок (т. зв. «стопа Столетова»), то при падінні на них світла під кутом Брюстера і той, що пройшов, і той, що відбився промені виявляться практично повністю поляризованими. Тому стопа Столетова може служити в якості поляризатора і аналізатора, як у відбитому, так і в світлі, що проходить.

Оправа стопи Столетова служить для установки її під кутом Брюстера.

На оптичній лаві встановлюють стопу Столетова, яка ділить промінь на два – заломлений і відбитий. Показують, що відбитий і заломлений промені поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах. Для цього знову використовують в якості аналізатора малий поляроїд в оправі. Дії аналогічні випадку А).

В). Більш складний варіант досліду – як аналізатор використовується чорне діелектричне дзеркало. Перша частина досліду – дослідження заломленого стопою світла. Встановлюють чорне дзеркало на низькій підставці так, щоб на нього падав заломлений стопою промінь.



Відбитий від чорного дзеркала промінь спрямовують на стіну або стелю аудиторії (див. рис). На них утворюється світла пляма. Відбитий від стопи промінь за-

кривають картонкою, щоб не заважав. Віссю обертання дзеркала служить напрямок падаючого на нього світлового пучка. Повертаючи дзеркало вліво і вправо навколо осі, спостерігають зміну яскравості плями. Максимум на стінах аудиторії, мінімум - на стелі (на малюнку видно, що у відбитому від дзеркала на стелю промені немає коливань, перпендикулярних до площини падіння).

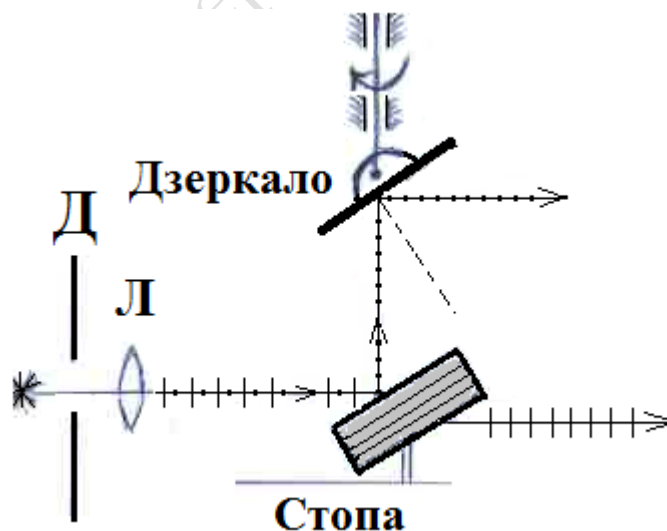
Друга частина досліду - дослідження відбитого від стопи світла. Установлюють чорне дзеркало на високій підставці так, щоб на нього падав *відбитий від стопи промінь*. Заломлений промінь закривають картонкою. Обертаючи дзеркало, бачимо, що інтенсивність відбитого променя змінюється - максимум на стіні, мінімум - на стелі аудиторії.

Пояснення досліду. Світло, що пройшло через стопу, є поляризованим так, що коливання світлового вектора відбуваються в площині падіння.

Відбите від поверхні діелектрика (скляної пластинки стопи або поверхні чорного діелектричного дзеркала) світло поляризоване так, що коливання світлового вектора відбуваються перпендикулярно до площини падіння.

Дзеркало, яке поставлене під кутом Брюстера, відбиває тільки ті коливання, які є перпендикулярними до площини падіння світла на дзеркало.

Ця обставина пояснює обидва варіанти досліду.



Примітка. Дослід зі стопою Столетова і чорним діелектричним дзеркалом супроводжується демонстрацією, якій показує поляризація променя після відби-

ється демоделі, на на поляменів до і ванья.

(*)
Подвійне незалом-кристалах ського

При-
тична лава,
ний ліхтар, два кристала ісландського шпату в оправках, малий поляроїд, ніколь, екран.



5.14. промелення в ісландшпату

лади: оп-проекцій-

Дослід. Дослід слід проводити в затемненій аудиторії. На спеціальну (малу) оптичну лаву встановлюється кристал ісландського шпату в оправі. При прохо-

дженні крізь нього світла від проекційного ліхтаря відбувається розщеплення світлового променя на два – звичайний і незвичайний, які поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах.

Промені падають на великий екран, встановлений за лекційною дошкою. На екрані видно дві світлових плями.

Це сліди звичайного і незвичайного променів.

Потім обертають кристал шпату в оправі навколо променя. Кристал шпату орієнтований і закріплений в оправі таким чином, що при обертанні оправы один з променів залишається на місці (звичайний), інший рухається по колу навколо нього (незвичайний).



Перший варіант досліду. Поляризацію променів можна перевірити. Демонстратор (або лектор) підходить впритул до великого екрана і досліджує кожну з світлових плям поворотом малого поляризатора. Малий поляризатор тримають на витягнутій руці близько до екрану настільки, щоб його проекція була чітко видимою на екрані. Обидва промені можна погасити. Отже, обидва вони поляризовані, причому у взаємно перпендикулярних напрямках.

Другий варіант досліду. На лаву додатково ставиться ніколь. Тут він грає роль аналізатора і замінює малий поляроїд попереднього досліду. Обертаючи ніколь в оправі, гасять по черзі обидва променя і приходять до того ж висновку, що і в першому варіанті досліду.

(*) ЗАУВАЖЕННЯ.

Цей і ряд інших дослідів, позначених зірочкою, є цікавими в чисто історичному плані. Сучасна техніка фізичного експерименту замість ніколя використовує досконаліші прилади і поляроїди. Кристали шпату є раритетами, що збереглися, наприклад, в НТУ «Дніпровська політехніка». Вважаємо, що дослід з кристалами шпату і ніколями можна демонструвати тільки за наявності великого навчального часу і відповідного навчального плану (трисеместровий університетський курс).

(*) 5.15. Модель призми Ніколя

Демонструється велика скляна модель призми У. Ніколя. Перша поляризаційна призма була винайдена У. Ніколем в 1828 р. Вона виготовляється з двох призм із ісландського шпату, склеєних канадським бальзамом уздовж діагональної площини. Модель дає просторове уявлення про розміщення перерізу в призмі Ніколя, про хід звичайного і незвичайного променів і їх поляризації.



Фізичні принципи роботи призми описані в підручниках, наприклад, [1], т.3, стор. 162.

(*) 5.16. Поляризація світла. Перевірка закону Малюса за допомогою двох ніколів

Прилади. Мала оптична лава. Два ніколів в оправках. Рейтери. Освітлювач. Екран.

Дослід. Дослід слід проводити в затемненій аудиторії. На оптичну лаву ставлять один за одним два ніколів (див. рис. до 5.14). Вони грають роль поляризатора і аналізатора. Включають освітлювач. На екрані спостерігають світлу пляму. При обертанні одного з ніколів навколо променя відповідно до закону Малюса поле зору поступово затемнюється до повної темряви при схрещених ніколях.

5.17. Властивості поляризованого світла. Перевірка закону Малюса за допомогою двох поляроїдів

Прилади: діапроектор «Полілюкс», великий і малий поляроїди, спеціальний тримач малого поляроїда, екран. Дослід проводять в затемненій аудиторії.

Дослід. Спочатку на великий екран аудиторії, розташований за дошкою, проектують природне світло від проектора «Полілюкс». Демонстратор бере в руку малий поляроїд, підходить до екрану і наближає малий поляроїд до екрану настільки, щоб отримати його чітку проекцію. Світло, що пройшло через малий поляроїд на екран, має зеленуватий відтінок за рахунок селективного часткового поглинання світла плівкою поляроїда.

Демонстратор обертає малий поляроїд навколо напрямку світлового потоку. Аудиторія бачить, що зміни інтенсивності світла не відбувається.

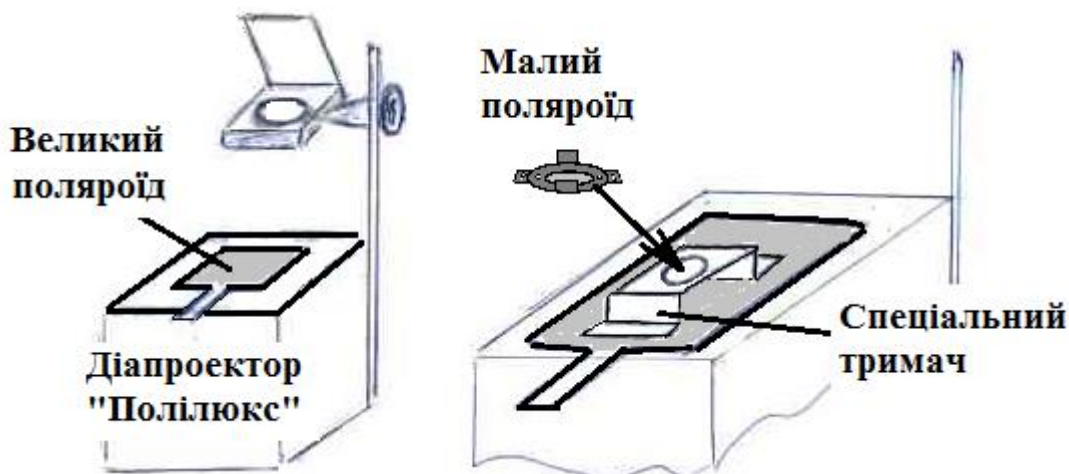
Потім на екран проєктують поляризоване світло. Для цього на предметний столик проєктора «Полілюкс» кладуть пластину поляроїда розміром 20 X 30 см від поляризаційного мікроскопа.

Демонстратор повторює ті ж дослідження світла малим поляроїдом. Слухачі бачать, що поляризоване світло можна загасити другим поляроїдом.

5.18. Інтерференція поляризованих променів

Прилади: діапроектор «Полілюкс», великий і малий поляроїди, спеціальний тримач малого поляроїда, слюдяні кружечки, метелик зі слюди, екран.

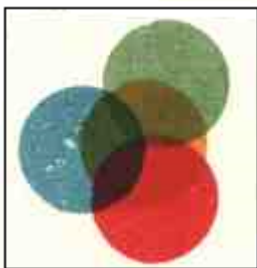
Дослід. Дослід проводять в затемненій аудиторії. На предметний столик діапроектора кладуть велику пластину поляроїда, зверху якої ставлять тримач малого поляроїда. На пластину великого поляроїда під тримач поміщають по черзі: **шматочок мінералу слюди**; скляну пластинку з наклеєними слюдяними кружками, **фігурку метелика**, вирізану з слюди.



За допомогою об'єктива діапроектора налаштовують чітке зображення слюдяних кружків на великому екрані.

Потім вставляють в отвір тримача

малий поляроїд. На екрані з'являється кольорове зображення слюдяних кружків. Повертаючи малий поляроїд на 90° , спостерігають, як забарвлення кружків слюди змінюється на додаткове (додатковими є кольори, при змішуванні яких виникає білий колір).



Пояснення досліду. Поляризований за допомогою великого поляроїда білий світ, проходячи слюдяні шари, зазнає подвійного променезаломлення, розділяючись на дві компоненти – звичайну і незвичайну. Малий поляроїд, який грає роль аналізатора, виділяє з кожної компоненти ті складові,



вектора E яких паралельні площині аналізатора; результат інтерференції цих компонент і спостерігається на екрані. Кольори інтерференції залежать від товщини слюдяного шару, різниці показників заломлення для звичайного і незвичайного променів, а також довжини хвилі падаючого світла. Товщина слюдяних кружків в

різних місцях пластинки є різною, тому на екрані спостерігається система смуг рівної товщини. Мінімум в інтерференції на одній з довжин хвиль, що входять до складу білого світла, означає максимум освітленості в кольорі, що доповнює першу хвилю до білого. Тому при освітленні слюдяних кружків білим світлом на екрані спостерігається кольорова картина.

5.19. Штучна анізотропія. Досліди з пластинками і моделями, поміщеними між схрещеними поляроїдами

Прилади: діапроектор «Полілюкс», великий і малий поляроїди, спеціальний тримач малого поляроїда, набір прозорих моделей з плексигласу і епоксидної смоли (балка, платівка, ферма моста), екран. Дослід проводять в затемненій аудиторії.

Мета досліду. Показати, як в ізотропних прозорих тілах під дією механічної напруги виникає подвійне променезаломлення.

Дослід. Дослід проводять в затемненій аудиторії. Включають діапроектор, кладуть на його предметний столик великий поляроїд, а на нього – спеціальний тримач. У віконце тримача поміщають малий поляроїд. Таким чином, на екран проектується світло, що пройшло через два поляроїда. Схема розміщення приладів показана на рисунку до досліду 5.17.

Між спеціальним тримачем і великим поляроїдом можна поміщувати різні пластинки і інші прозорі предмети.

1. На великий поляроїд під тримач поміщають пластинку з чутливої оптичної пластмаси (два варіанти – плексиглас білого кольору і епоксидна смола жовтого кольору), кінці якої закріплені в обійми з хвостовиками.

Попередньо прибирають малий поляроїд і за допомогою об'єктива на екрані отримують чітке зображення пластинки. Ставлять на місце малий поляроїд і, повертаючи його, домагаються мінімуму освітленості зображення на екрані.

Потім хвостовики поступово стискають пальцями. Пластинка при цьому розтягується у верхній частині і стискається в нижній частині (згин). Недеформованою залишається середня частина. При згині кромки пластинки світлішають, а середня частина залишається затемненою.

У випадку білої пластинки механічно деформовані області зображення зривка на екрані просвітлюються. У разі жовтої пластинки становляться видимими кольорові лінії рівних напружень.

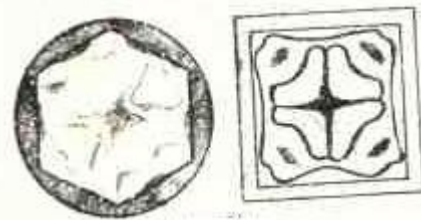


2. Тепер між схрещеними поляроїдами поміщають круглу прозору пластинку в лещатах, деформація якої відбувається при закручуванні гвинта (жартівлива назва – середньовічний «башмак інквізиції»). Є пластинки білого кольору зі звичайного плексигласу, і жовтого кольору – з епоксидної смоли. Загвинчуючи лещата і відпускаючи гвинт, спостерігають на екрані рух смуг рів-

них напружень.



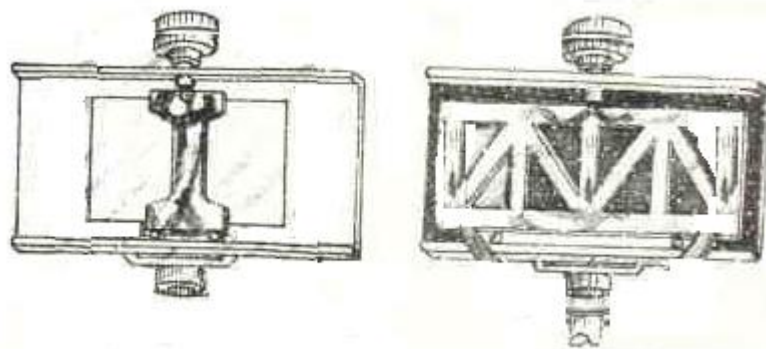
3. Потім демонструється набір загартованих стекол в оправках. Видно картини розподілу залишкових напруг, що виникли при охолодженні скла. Поворотом малого поляроїда змінюють кольори світла, що пройшло, на додаткові - чорні місця стають білими і навпаки.



Пояснення досліду. Оптично ізотропне тіло під дією механічних деформацій стає оптично анізотропним. Виникає штучна анізотропія, тобто властивості середовища в різних напрямках стають неоднаковими. У разі одностороннього стискання або розтягування напрям деформації відіграє роль оптичної осі.

За характером інтерференційної картини судять про розподіл деформацій. Це використовується для оптичного дослідження напружень в прозорих моделях (метод фотопружності). Виготовивши моделі реальних конструкцій – балок, швелерів, рейок і т.д. – з прозорої пластмаси, можна вивчати картину розподілу в них механічних напружень при всіляких видах навантаження і давати рекомендації щодо вдосконалення їх конструкції.

4. Для демонстрації оптичного методу дослідження напружень виготовлена модель ферми залізничного мосту з органічного скла, яка навантажується загвинчуванням гвинта. Схрещують поляроїди. Поле зору стає темним. Обертаючи головку гвинта від руки, в місцях концентрації напружень спостерігають просвітлення поля зору.



Поступово послаблюють гвинт преса. Картина розподілу механічних напружень зникає. Поле на екрані знову стає затемненим.

5. На закінчення демонструються спеціальні моделі з «застиглими» напруженнями: гак підйомного крана, склепіння тунелів метро – трикутної і овальної форми.

5.20. Дисперсія світла. Дисперсійні призми

Прилади. Освітлювач (наприклад, діaproектор «Пеленг» 500-А). Діафрагма з вертикальною щілиною (слайд). Набір скляних призм. Екран.

Дослід. Включають живлення діaproектора в мережу. Переміщаючи об'єктив діaproектора за допомогою регулювального гвинта, домагаються різкого зображення на екрані вузької щілини від вставленого в проектор слайда.

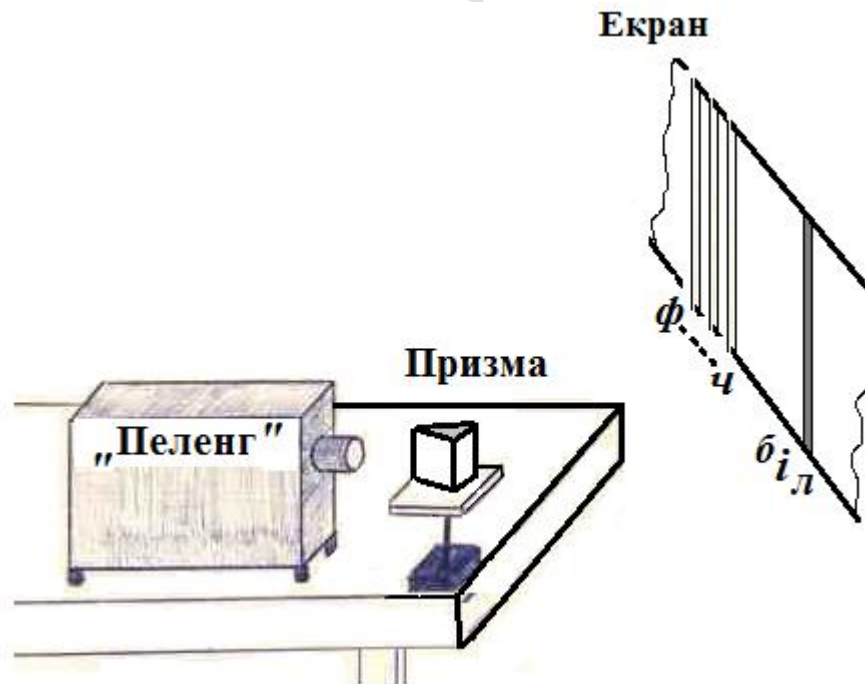
Потім перед об'єктивом проектора поміщають на предметному столику призму. Одна з граней призми повинна бути паралельна напрямку поширення променя світла.

На екрані отримується зображення щілини, по один бік від якої (центральної білої смуги) розміщується дисперсійний спектр.

На відміну від дифракційного спектра, ближня до центру лінія є червоною.

Потім на предметний столик поміщають по черзі призми з різними показниками заломлення - зі скла сорту «крон» і скла сорту «флінт».

Для призми зі скла «важкий флінт» відхилення променя є більшим і дисперсія є більшою, ніж для призми зі скла «легкий крон». Це пояснюється тим, що для «флінта» $n \approx 1,66$ (від червоного до фіолетового кольору), а для «крона» $n \approx 1,52$.



5.21. Демонстрація світловоду

Прилади: блок лазерного випромінювача ($\lambda = 0,63$ мкм) з навчального приладу ЕСФЕ-1 «Оптика», світловод, переносний екран.

Дослід. Блок лазерного випромінювача встановлюється на демонстраційному столі так, щоб лазерний пучок був направлений уздовж столу в сторону від спостерігачів. Переносний екран, закріплений в рейтер, розміщують на невеликій відстані під невеликим кутом до осі падаючого пучка.

На механічній осі блоку лазерного випромінювача встановлюється блок лінз в положення «Л», чим отримують точкове джерело світла.

Затемнюють аудиторію. Включають лазер.

Отримують на екрані яскраву пляму від лазерного пучка світла. Якщо є можливість, задимлюють шлях лазерного променя, демонструючи його прямолінійність.

Встановлюють і закріплюють на механічній осі блоку лазерного випромінювача узгоджувач зі світловодом. Обертаючи спочатку одну з ексцентричних втулок узгоджувача, домагаються максимально яскравого пучка на виході світловода. Потім, відпустивши ручку-гвинт, звільняють другу ексцентричну втулку узгоджувача. Повертаючи її, домагаються рівномірної освітленості світлової плями на екрані від пучка, що виходить із світловода. Затискають ручку-гвинт.

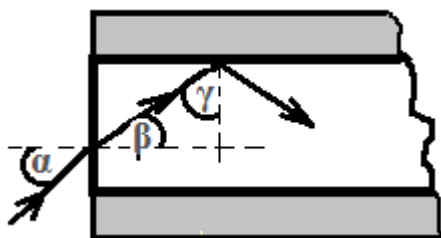
Кінцем оголеної частини світловода водять по переносному екрану, демонструючи переміщення світлової плями.

Обережно згинають гнучку скляну жилу світловода. Звертають увагу на зростання розсіювання світла в місці згину.

Пояснення досліду.

Коли світловий пучок поширюється в атмосфері, він частково розходить, поглинається і розсіюється. Можна значно зменшити втрати світлової енергії, а також передавати світло за криволінійними траєкторіями за допомогою світловода.

Направимо світловий промінь на торець тонкого скляного циліндричного стрижня, покритого оболонкою з меншим, ніж у скла показником заломлення.

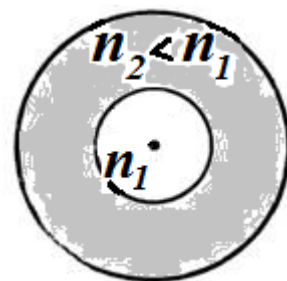


Промені, що входять в серцевину навіть під досить великими кутами до осі стрижня будуть зазнавати повного внутрішнього відбивання на межі поділу серцевини і оболонки і будуть поширюватися тільки уздовж серцевини. Такий пристрій називається світловодом.

Світловоди являють собою тонкі, гнучкі і довгі циліндричні прозорі скляні волокна, що вкриті оболонкою з показником заломлення $n_2 < n_1$. Доводиться, що показник заломлення волокон має задовольняти умові $n_1 \geq \sqrt{2}$.

Волокна об'єднують в джгути. Якщо один кінець джгута привести в контакт зі світним предметом, то на іншому його кінці утворюється зображення. При певному згині світловода порушується умова повного внутрішнього відбивання - частина променя розсіюється, виходячи назовні.

Світловоди знаходять застосування в системах оптичного зв'язку, в обчислювальній техніці, для передачі потужного лазерного випромінювання вздовж криволінійних каналів для медичних і технологічних цілей і ін.



Примітка. Під час перерви між лекціями прилад доступний для близького огляду.



Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка»
кафедра фізики

<http://physics.ntu.org.ua>

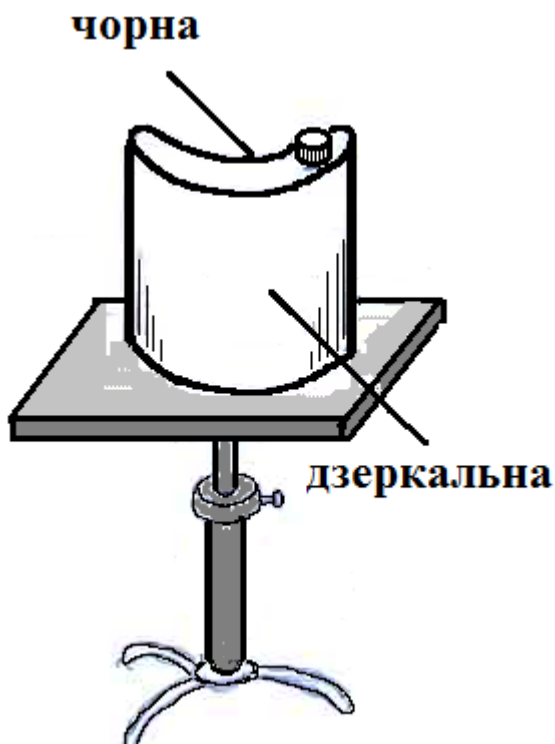
Частина 6

КВАНТОВА ФІЗИКА

6.1. Теплове випромінювання. Демонстрація закону Кірхгофа

Прилади. Спеціальна посудина - плоска металева фляга. Одна бічна поверхня цієї фляги пофарбована чорною фарбою, а інша - дзеркальна. Демонстраційний столик. Електричний чайник з окропом. Термостовпчик. Вимірювач демонстраційний ІД-1. Екран.

Дослід. Збирають схему з ІД-1. Фіксують світлову точку посередині шкали. Клеми термостовпчика з'єднують з входом ІД-1. Спочатку повертають термостовпчик прийомним рупором до дзеркальної і чорної поверхонь порожньої фляги. Показання однакові («зайчик» на середині шкали). Це природно, тому що фляга порожня і холодна.



Потім на очах аудиторії наливають у флягу окріп, і флягу загвинчують кришкою. Обидві поверхні фляги, таким чином, набувають однакової температури (покладають, близько 100°C - чайник недавно кипів).

Флягу по черзі обертають чорною і дзеркальною сторонами до термостовпчика, з'єднаного з вимірювачем. Відхилення зайчика на шкалі приладу (простіше направляти світлову точку лазерного випромінювання не на шкалу приладу, а прямо на великий екран в аудиторії) буде явно більше в тому випадку, коли випромінює чорна поверхня.

Якщо виникають проблеми з термостовпчиком, можна поводитись простіше.

В якості найпростішого реєстраційного приладу можна використовувати органи чуття людини - відчуття тепла тильною стороною

долоні або шкірою особи. Запрошується студент, якого просять закрити очі і до щокі якого по черзі підносять флягу з окропом чорною і дзеркальною сторонами. Аудиторія бачить, яким боком звернений до щокі студента випромінювач. Студент з закритими очима визначає, що чорна сторона гріє сильніше.

Пояснення досліду. Відповідно до закону Кірхгофа, чорна поверхня при тій же температурі, що і дзеркальна, має випромінювати інфрачервоні електромагнітні хвилі сильніше.

Вказівка для демонстратора. Щоб налити окріп через вузький отвір у верхній частині судини і не допустити утворення повітряних пробок, в отвір під час наливу вставляється скляна лійка, а простіше, відрізок товстої мідного дроту.

6.2. Модель абсолютно чорного тіла

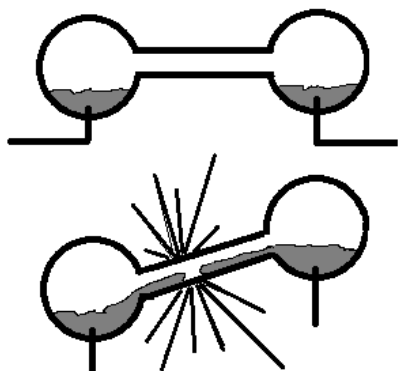
Пофарбована чорною фарбою сферична оболонка (зазвичай для цих цілей переробляють шкільний глобус). На поверхні сфери зроблено невеликий круглий отвір, діаметром приблизно 1 см. Отвір імітує чорне тіло - на тлі чорної поверхні сфери чітко виділяється ще більш чорний отвір.



6.3. Зовнішній фотоефект

Прилади: ртутна лампа, трансформатор ртутної лампи, цинкова пластина, укріплена на ізолюючій підставці, електроскоп, палички: скляна і лист гуми, пластмасова і шматок вовняної тканини, лист віконного скла, з'єднувальні дроти.

Схема досліду. Світло від ртутної дугової лампи потрапляє на цинкову пластину. Пластина з'єднана дротом з електроскопом. Пластину заряджають або позитивно, або негативно і спостерігають вибивання світлом електронів з поверхні пластини.



Спочатку запалюють ртутну дугову лампу.
А Збирають схему: трансформатор для ртутної лампи (міститься внизу лівої частини демонстраційного столу) з'єднують трироз'ємним штекером з ртутної лампою. Двороз'ємним кінцем трансформатор включають в розетку на столі з написом «120 В».

Головна частина ртутної лампи - колба з ртуттю і двома електродами (див. Рис.).

У вихідному положенні **А** колба розташована горизонтально, коло розірване і струм через лампу

не проходить.

Потім правою рукою тиснуть на пускову кнопку зверху трансформатора, а лівою рукою повільно повертають ручку на тильній стороні лампи - ртутну колбу - так, щоб ртуть переливалася з одного кінця колби в інший (ситуація **Б** на малюнку).

Ручку ртутної лампи повертають різко на себе, а потім плавно від себе поки не виникне розряд в лампі.

У місці розриву ртуті при нахилі загоряється дуговий розряд, який продовжує горіти в парах ртуті і при поверненні колби в горизонтальне положення. Віконце лампи закривають через дуже яскраве видиме світло і ультрафіолет.

Дослід. Потім починається власне дослід. Спочатку заряджають цинкову пластину *позитивно* від скляної палички, потертої об гуму. Електроскоп показує наявність певного заряду. Відкривають віконце ртутної лампи і спостерігають за показаннями електроскопа. Зменшення заряду практично не відбувається. Закривають віконце.

Після цього розряджають електроскоп дотиком руки і знову *заряджають*, але *тепер негативно*. Відкривають віконце лампи. При освітленні пластинки стрілка електроскопа показує швидке зменшення заряду.



Повторюють останній варіант досліду, але на шляху світла з віконця ставлять пластину з віконного скла. Скло затримує ультрафіолет і пропускає видиме світло. Негативний заряд не зменшується, стрілка електроскопа не рухається. Забирають скло - фотоефект відбувається. Якщо поперемінно ставити і видаляти скло, можна то зупиняти стрілку електроскопа, то змушувати її рухатися.

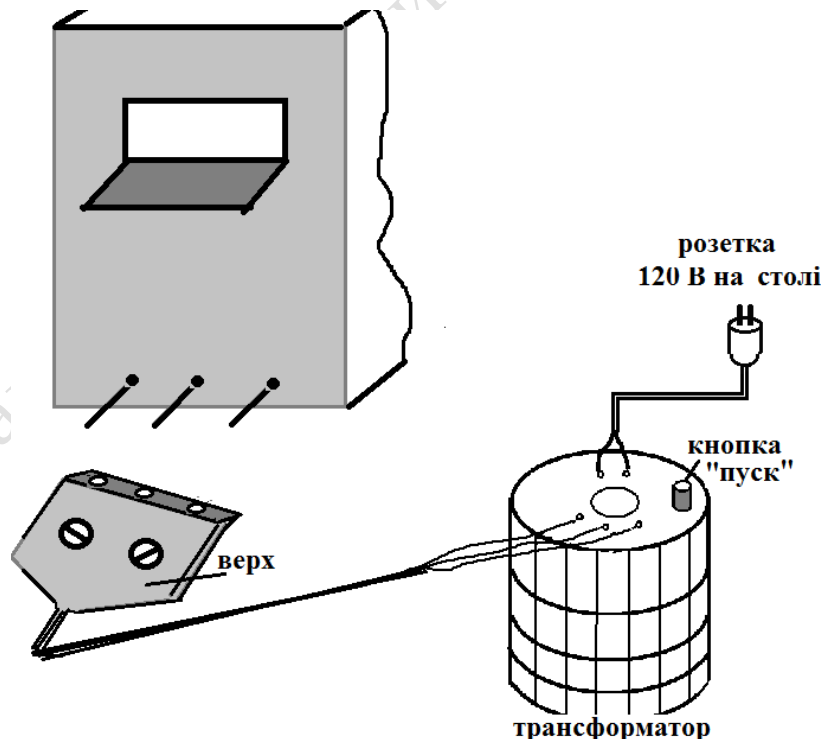
Примітка. Перед показом досліду цинкову пластинку зачищають дрібним наждачним папером («шкіркою») для зняття окислів.

Поясду. Світло трони з пове- ни. При цьо- електронів з талу може ше в тому ви- енергії пада- достатньо для роботи вихо- ному експе- повідає ульт- му світлу.

При по- зитивному за- ряді цинкової пластини виникає додаткове кулонівське притя- гання вирваних світлом електро- нів до її поверхні. Вирвані світ- лом електрони притягуються до пластини і знову осідають на ній, що призводить до збережен- ня заряду металевої пластини.

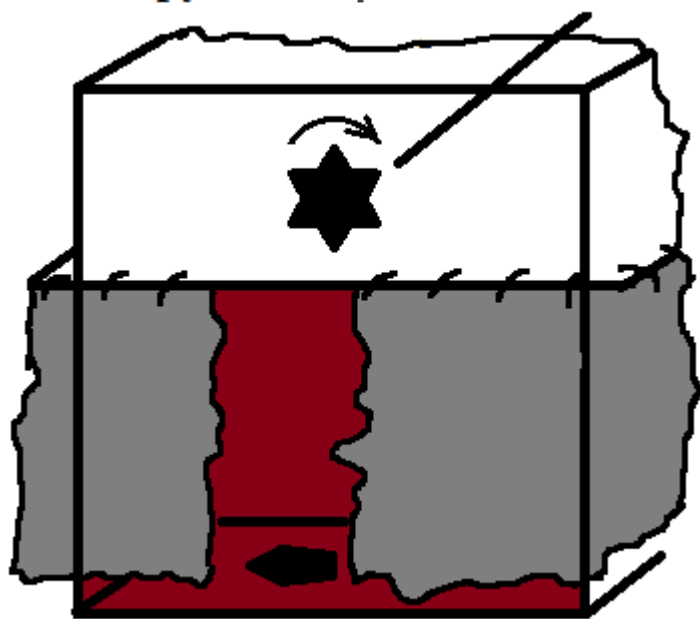
Негативне зарядження цієї пластини призводить до відшто- вхування емітованих електронів від її поверхні і електроскоп роз- ряджається.

Скло сильно поглинає ульт- рафіолетові промені - при уста- новці скляної пластини на шляху світлового пучка фотоемісія



нення дослі-
вириває елек- рхні пласти- му фотоемісія поверхні ме- виникати ли- падку, коли ючого кванта здійснення ду, що в да- рименті від- рафіолетово-

ручка запалювання лампи



тильна сторона лампи

припиняється.

6.4. Фотореле

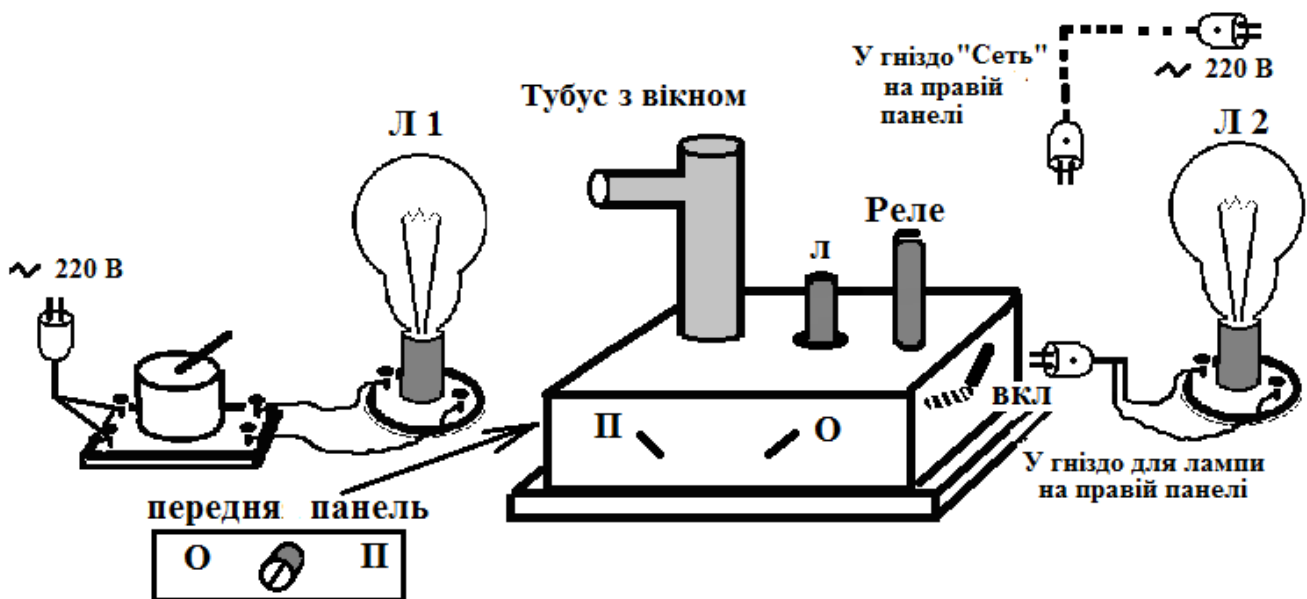
Прилади. Фотореле з вакуумним фотоелементом. Фотореле з фототранзистором. Лампи розжарювання на підставках. Вимикач. З'єднувальні дроти.

Дослід. Є два варіанти досліду.

Перший варіант - на основі скляного вакуумного фотоелемента (дослід морально застарів і демонструється рідко).

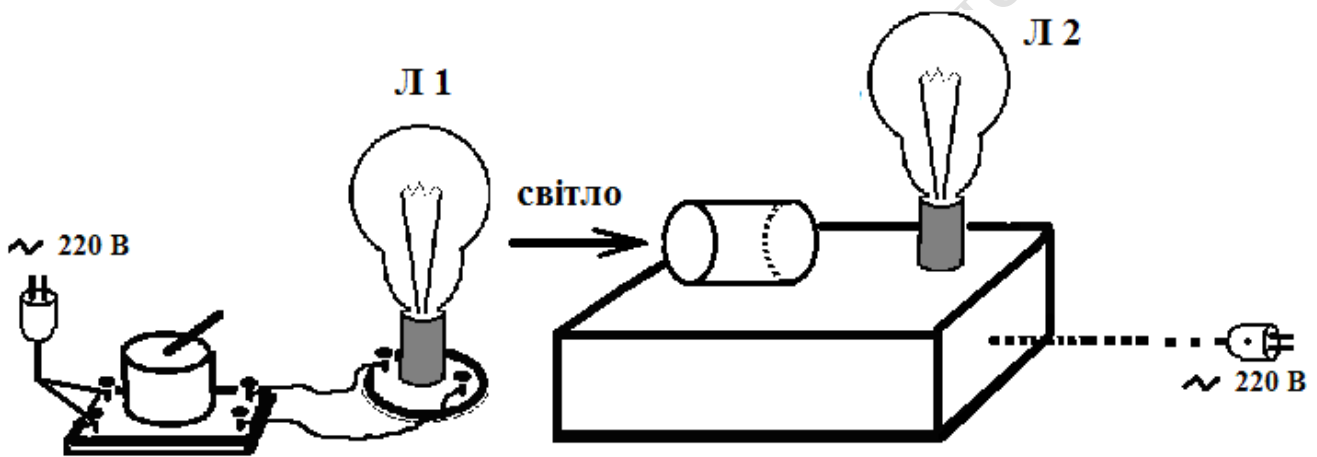
Вакуумний фотоелемент встановлений на панелі лампового підсилювача. (Демонстратор знімає захисний чохол-тубус, і фотоелемент стає видимим аудиторії).

Світло від лампи розжарювання потрапляє в віконце тубуса і далі на фотоелемент. Фотострум посилюється ламповим підсилювачем, посилений струм пускає в хід електромагнітне реле. Якщо фотоелемент спрацьовує, загоряється друга лампа, включена в гніздо на правій панелі.



Можна налаштувати пристрій поворотом регулювального гвинта на передній панелі пристрою таким чином, щоб при спрацьовуванні фотоелемента друга лампа, навпаки, гасла. (П - пряме включення, О - зворотне). Останнє моделює ситуацію автоматичного виключення вуличного освітлення (друга лампа) при сході сонця (перша лампа).

Другий варіант використовує більш сучасну напівпровідникову схему з фототранзистором. Світло від лампи Л1 направляють в пластиковий циліндр, в задньому торці якого розміщений фотоприймач.



Перекриваючи долонею світло від лампи *Л 1*, демонстратор запалює (або гасить) лампу *Л 2*. Якщо долоню розчепирити, можна «рахувати пальці» на руці.

6.5. Фотолюмінесценція. Флуоресценція і фосфоресценція

Прилади. Набір трубок з рідинами, що флюоросціюють, порошкоподібними люмінофорами. Ртутна лампа.

Дослід. Цей дослід завжди є продовженням досліду 6.3 «Зовнішній фотоефект», оскільки використовується запалена ртутна лампа - потужний випромінювач ультрафіолету.

Тильна частина ртутної лампи спеціально виготовлена у вигляді своєї «сцени», закритою шторками (див. рис.). Це зона ультрафіолетового випромінювання ртутної лампи. Аудиторію затемнюють і на «сцену» по черзі виставляють:

- шматок крейди на долоні - в УФ крейда має коричневий колір;
- нафта в пробірці;
- мінерал флюорит, в УФ мінерал світиться блакитними і фіолетовими відтінками;
- набори рідких і порошкоподібних речовин. Особливо ефектно т.зв. «післясвітіння», коли винесений за межі лампи набір порошоків продовжує світитися в темряві;
- найбільший інтерес аудиторії викликають грошові купюри - гривні і долари - в ультрафіолетовому освітленні видно захисну люмінесціюючу фарбу.

Пояснення дослід. Фотолюмінесценція - різновид люмінесценції, яка виникає при опроміненні речовини світлом.

При опроміненні речовини світлом відбувається перехід електронів на більш високий енергетичний рівень.

$$E_2 - E_1 = h\nu .$$

Після поглинання світла частина отриманої енергії витрачається в результаті релаксації. Частина, що залишилася може бути випущена у вигляді фотона. Тому під час люмінесценції випромінюються, як правило, фотони з меншими частотами (більшими довжинами хвиль, стоксово випромінювання).

За тривалістю люмінесценції її поділяють на флуоресценцію (малий час після світіння) і фосфоресценцію (тривале світіння).

Дослід ілюструє явища флуоресценції рідин і фосфоресценції порошкоподібних люмінофорів, що збуджуються ультрафіолетовим світлом.

6.6. Дозиметричні прилади

Для вимірювання бета- і гамма-випромінювання використовують різного роду радіометри, дозиметри та інші прилади.

Як детектор іонізуючого випромінювання часто застосовують газорозрядні лічильники Гейгера-Мюллера (рис.1).

Лічильник Гейгера-Мюллера складається з металізованої зсередини скляної трубки (в інших радіометрах з металеві тонкостінної трубки), уздовж осі якої протягнута тонка металева нитка (рис.2).



Рис.1.

Принципова схема будь-якого газорозрядного дозиметричного приладу показана на рис. 2.

Трубка служить катодом, нитка - анодом. Між ниткою і стінками трубки прикладена напруга в кілька сотень вольт. Герметичний резервуар заповнюється інертним газом за зниженого тиску 100 - 200 мм рт. ст. Це робиться для збільшення довжини вільного пробігу і полегшення ударної іонізації газу.

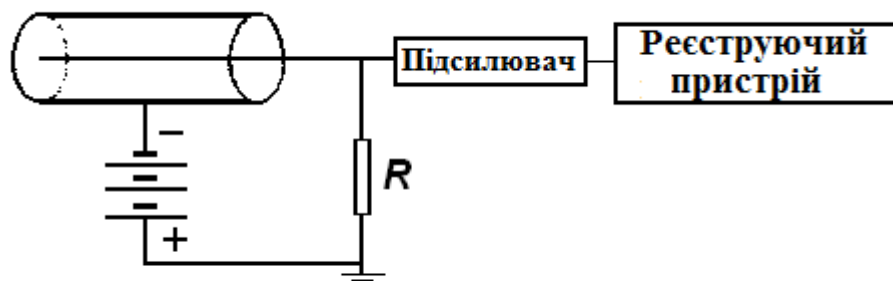


Рис. 2.

Проникаючи всередину трубки, γ -випромінювання іонізує атоми газу на своєму шляху. Виникаючі вільні електрони рухаються до нитки.

Поблизу нитки напруженість електричного поля є великою, і електрони прискорюються настільки, що починають в свою чергу іонізувати газ. У міру наближення до нитки число електронів лавино подібно наростає (рис. 3).

Поблизу нитки напруженість електричного поля є великою, і електрони прискорюються настільки, що починають в свою чергу іонізувати газ. У міру наближення до нитки число електронів лавино подібно наростає (рис. 3).

За рахунок ударної іонізації виникає коронний розряд, що поширюється уздовж нитки, і струм через лічильник різко зростає. Імпульс напруги з резистора R посилюється і реєструється.

Поки триває розряд, лічильник не може реєструвати інші частинки. Щоб лічильник міг реєструвати нову частинку, необхідно погасити лавинний розряд. Для цього в коло лічильника включають резистор з великим опором порядку $10^8 - 10^9$ Ом. При проходженні струму на цьому резисторі виникає велике падіння напруги, внаслідок чого різко зменшується напруга між трубкою і ниткою (катодом і анодом), що призводить до припинення розряду.

Для зменшення тривалості розряду лічильник заповнюється аргоном з домішкою метану або парів спирту. Позитивні іони на шляху до катода при зіткненні з масивними молекулами метану або спирту нейтралізуються і вже не можуть вибитися з катода електрони, необхідні для підтримки розряду. Час відновлення чутливості лічильника визначається часом дрейфу іонів до катода і становить близько 10^{-4} с.

Для оперативного дозиметричного контролю радіаційної обстановки застосовується *дозиметр ДРГ-05* (рис. 4)

Вимірювання ПЕД (потужності експозиційної дози) в ньому засноване на вимірі інтенсивності сцинтиляцій в органічному сцинтиляторі на основі полістиролу. Спалахи сцинтилятора реєструються ФЕП, струм в якому перетворюється в імпульси напруги.



Рис. 4.

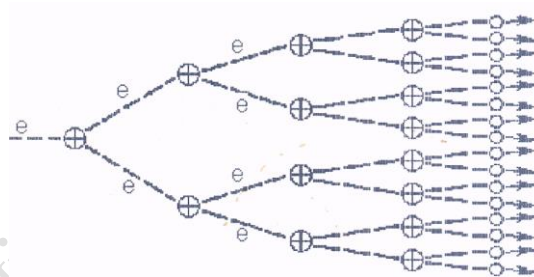


Рис. 3.

Геологорозвідувальний *радіометр СРП-08-01* (рис. 5,6) також є сцинтиляційним приладом. Детектором тут служить кристал йодистого натрію. Прилад застосовується для пошуку радіоактивних руд і

для радіометричного контролю кар'єрів і гірничих виробок.



Рис. 5.



Рис. 6.

Елементи.

Поглинюючого ви-
- енергія, пог-
ницією маси

опромінюється, $D = \frac{W}{m}$, $[D] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = \text{Гр(грей)}$.

нти дозиме-

нена доза іо-
промінювання
линенна оди-
об'єкта, що

Використовується також позасистемна одиниця - **рад**:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг, тобто } 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад.}$$

Для відображення небезпеки опромінення для живого організму вводять поняття **еквівалентної дози**. Щоб отримати значення еквівалентної дози, треба величину поглиненої дози помножити на «**коефіцієнт якості випромінювання**» Q . Біологічний вплив випромінювання прийнято порівнювати з ефектами від рентгеновського і γ -випромінювання, яке береться за еталон. Для нього за визначенням вважають $Q = 1$. Одиницею вимірювання еквівалентної дози в системі СІ служить **зіверт (Зв)**:

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} \cdot Q.$$

Використовують також позасистемну одиницю - **бер** (біологічний еквівалент рентгена): $1 \text{ бер} = 1 \text{ рад} \cdot Q$, тобто

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер.}$$

Для характеристики радіаційної обстановки на місцевості і в приміщеннях використовують поняття **експозиційної дози**: кількість рентгеновського або γ -випромінювання, що виражена в одиницях заряду одного знака, породженого ним в одиниці маси сухого повітря в даній точці простору. Одиницею вимірювання в системі СІ є **Кл / кг**. На практиці часто використовують позасистемну одиницю - **рентген (Р)**:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл / кг.}$$

Доза іонізуючого випромінювання є тим більшою, чим більшим є час опромінювання. Тому використовують також поняття **потужності дози**: це відповідна (експозиційна, поглинута або еквівалентна) доза, віднесена до одиниці часу:

$$1 \text{ Р/год, } 1 \text{ Зв/год і т. п.}$$

Для попередження гамма і бета- радіаційної небезпеки служить побутовий **дозиметр-радіометр МКС-05 "Терра-П"**. Він створений на базі сучасного професійного дозиметра, який перебуває на озброєнні силових структур України. «Терра-П» експортується в багато країн.

Порядок роботи з дозиметром «ТЕРРА».

1. Для увімкнення дозиметра необхідно короткочасно натиснути кнопку РЕЖИМ. На цифровому індикаторі при цьому висвічується інформація. Для виключення дозиметр потрібно знову натиснути кнопку РЕЖИМ і утримувати її в натиснутому стані 4 с.



Рис. 7.

2. Після включення дозиметр автоматично переходить в режим вимірювання потужності еквівалентної дози (ПЕД) γ - випромінювання. Ознаками цього режиму є висвітлювання символу $\mu\text{Sv/h}$ (мкЗв/год) на цифровому індикаторі і короточасні слабкі звукові сигнали (кожен звуковий сигнал - це зафіксований квант γ - випромінювання). При цьому на індикаторі вже на перших секундах будуть висвітлюватися результати вимірювань. Оскільки в дозиметрі передбачено постійне усереднення результатів вимірювання, то з кожним наступним оновленням значення на цифровому індикаторі відбувається процес його уточнення. Таким чином, **приблизно через хвилину** після початку вимірювань на індикаторі **можна отримати результат**.

Для вимірювання потужності еквівалентної дози (ПЕД) γ - випромінювання необхідно дозиметр орієнтувати міткою «+» на нижній кришці приладу в напрямку до досліджуваного об'єкта.

Література

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т, Луцик П.П. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – К.; «Техніка», 1999, – 536 с. Т.2: Електрика і магнетизм. – К.; «Техніка», 2006, – 452 с. Т.3: Оптика. Квантова фізика. – К.; «Техніка», 2006, – 518 с.

2. В. М. Барановський, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук та ін.. Загальна фізика: Лабораторний практикум.: Навч. посібник. За заг. ред.. І. Т. Горбачука. – К. Вища школа., 1992 – 509с.