МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп’ютерної фізики та енергетики

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи бакалавра

на тему:

Динамічний вплив випромінювання на фізичні об'єкти в умовах резонансу

Виконала: студентка 4 курсу,

групи НФ-41 Цапенко А.А.

Спеціальність

105 прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма:

прикладна фізика енергетичних систем

Керівник: кандидат фіз.-мат. наук, доцент
Кудрявцев І.М.

Рецензент:

Харків – 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр

Спеціальність 105 прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ _____

підпис ініціали, прізвище

"____"_____20___року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

_____ Цапенко Альони Анатоліївни_____

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Динамічний вплив випромінювання на фізичні об'єкти в умовах резонансу»,

керівник роботи Кудрявцев Ігор Миколайович, канд. фіз.-мат. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "___"_____20__ року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити: розглянути теоретичний аналіз особливостей пондеромоторної взаємодії та способів її математичного опису. Розробити та зібрати оригінальний лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень пондеромоторної взаємодії. Виконати експериментальне дослідження якісних ефектів у галузі резонансу для обраної фізичної системи в акустичному полі з градієнтом інтенсивності.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Аналіз науково-технічної літератури. Основні теоретичні відомості. Основні типи резонансу
2	Вивчення впливу резонансу на роботах професора П.Н Лебедєва
3	Проведення експериментальних досліджень. Складання експериментального стенду
4	Висновки

5. Дата видачі завдання _____

Студент ЦапенкоА.А.

підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ __Кудрявцев І.М.__

підпис ініціали, прізвище

Реферат

Цапенко Альона Анатоліївна «Динамічний вплив випромінювання на фізичні об’єкти в умовах резонансу » (випускна робота бакалавру), - Харків: ХНУ. імені В.Н. Каразіна, 2022

Робота присвячена вивченню динамічного впливу випромінювання в умовах резонансу.. Вона складається з вступу, трьох розділів, висновку, містить 11 малюнків, 7 графіків, 4 таблиці, список використаних джерел з 12 найменувань. Була виконана робота в вивченні матеріалу і побудові стенду для експериментальних досліджень якісних ефектів у галузі резонансу для обраної фізичної системи в акустичному полі з градієнтом інтенсивності. А також проведення дослідження, результатом якого - пондеромоторна взаємодія може застосовуватися для дистанційного управління поведінкою динамічної системи в умовах, близьких до резонансних.

Ключові слова: резонанс, резонансна частота, пондеромоторні сили, опромінення.

Abstract

Tsapenko Alyona Anatoliivna "Dynamic influence of radiation on physical objects in the conditions of resonance" (bachelor's thesis), - Kharkiv: KhNU. named after V.N. Karazin, 2022.

The work is devoted to the study of the dynamic effect of radiation in resonance conditions. It consists of an introduction, three sections, a conclusion, contains 11 figures, 7 graphs, 4 tables, a list of used sources of 12 names. Work was performed in the study of the material and the construction of a stand for experimental studies of qualitative effects in the field of resonance for the selected physical system in an acoustic field with an intensity gradient. As well as conducting research, the result of which ponderomotor interaction can be used for remote control of the behavior of a dynamic system in conditions close to resonant.

Keywords: resonance, resonant frequency, ponderomotor forces, irradiation.

ЗМІСТ

Вступ 6

Розділ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 10**0**

1.1 Основні теоретичні відомості. Основні типи резонансу 100

1.2 Резонанс у лінійних системах 144

1.3 Резонанс нелінійної системи 166

1.4. Експерименти Герца 211

РОЗДІЛ 2. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЗОНАНСУ НА РОБОТАХ 28**8**

ПРОФЕСОРА П.Н ЛЕБЕДЄВА 28**8**

2.1. Пондеромоторні сили 28

2.2 Вивчення резонансу професором П. М. Лебедєвим 355

РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 40**0**

3.1. Складання експериментального стенду 400

3.2. Експериментальне дослідження поведінки системи в умовах резонансу 467

ВИСНОВКИ 49**0**

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 50**1**

ВСТУП

Поняття «резонанс» є одним із найвідоміших у науці. Дві маятникові години в резонансі синхронізуються, звукові хвилі потрібної частоти змушують барабан сильно вібрувати, а фотони, налаштовані атомні переходи, переводять атоми в збуджений стан. Фізики елементарних частинок часто відкривають нові частинки завдяки появі резонансів даних розсіювання. І, звичайно, всі ми покладаємося на резонанс при використанні бездротового зв'язку.

У 1965 році у своїх знаменитих лекціях з фізики Річард Фейнман припустив, що концепція резонансу стала настільки впливовою, що кожен новий том Physical Review містить щонайменше одну резонансну криву - характерний пік поглинання в аналогічній області спектра. внутрішня крива. частота. вивчалася якась коливальна система. Однак сучасні знання про цю концепцію затьмарюють незвичайну історію вкрай повільної розвідки, на повне усвідомлення якої пішло майже 300 років.

У середині XVII століття Галілей помітив, що одна людина, яка правильно тягне важкий маятник, може змусити його рухатися з такою силою, що він може легко підняти в повітря шість людей. Безперечно, інші бачили подібні ефекти раніше; Галілей писав. Але він не міг дати ніякої математичної інтерпретації і дійшов дуже невірних висновків про те, що відбувається, коли періодична сила приводить у рух природну систему, що вібрує. Зокрема, він дійшов висновку, що результуючий рух ніколи не може відхилятися від частоти коливальної системи.

Ця думка, мабуть, узгоджується з їхньою вірою в те, що припливи не можуть бути викликані впливом Місяця, а повинні мати інше походження. Незважаючи на припущення класичної та небесної механіки, Ісаак Ньютон ніколи не займався безпосередньо проблемою кондуктивного руху

неастрономічної гармонійної механічної системи. Перше сучасне розуміння предмета – і виправлення помилок Галілея – було передбачено розвитком диференціального обчислення у 18 столітті, коли Леонард Ейлер вирішив завдання за допомогою диференціального рівняння, схожого на те, що ми напишемо сьогодні. Він дійшов висновку, що в нерезонансних умовах рух веденої коливальної системи без тертя та демпфування матиме дві складові з різними частотами – вимушену частоту та власну частоту веденої системи. Він також розглянув випадок резонансного збігу двох частот, дійшовши висновку, що амплітуда коливань зростатиме згодом лінійно та потенційно безмежно. Можна було б очікувати, що цей прогрес у механіці висуне явище резонансу до центру фізики та техніки, але цього не сталося. Можливо, як зауважує Блек-Нойгауз, це сталося тому, що сам Ейлер вважав цю проблему просто математичним курйозом, який не має практичного значення.

Потім результати Ейлера ігнорувалися більше століття, доки Томас Янг знову не вивів їх самостійно у 19 столітті. Цікаво, однак, що Юнг розглядав цю проблему лише у зв'язку зі своїм аналізом припливів, тому його робота пізніше була проігнорована і не вплинула на всю механіку, чи то фізика чи технологія. Насправді весь час, аж до кінця XIX століття, вчені неохоче використовували термін «резонанс» для позначення чогось, крім акустичних явищ, з яких він виник. Використання цього слова в інших областях - особливо в механіці та аналізі вібрації в машинах - завжди включало застереження, що зв'язок був "тільки за аналогією", незважаючи на формальну еквівалентність основних динамічних рівнянь. Використання цієї концепції поширилося лише з визнанням Релеєм та Гельмгольцем резонансних ефектів у загальних акустичних системах у 1860-х роках, за якими пішли експерименти Вільяма Томсона, щоб продемонструвати природну резонансну поведінку LC-схем.

У 1885 році німецький фізик Антон Овербек опублікував статтю «Про явище електричних коливань, подібних до резонансу». Як виявилося, Овербек був першим ученим, який записав знамениту резонансну криву, що показує індуковану напругу на різних частотах і пік, що виникає в результаті резонансної взаємодії. Генріх Герц незабаром пов'язав такі резонансні явища з генерацією електромагнітних хвиль, що поширюються, а Гульельмо Марконі незабаром використав їх для реалізації бездротового зв'язку.

Але це, виявляється, сталося доти, як інженери справді почали розуміти роль резонансу у більш реалістичних механічних системах. Поступове визнання резонансу як механічного явища з'явилося лише тоді, коли драматичні поломки мостів та машин змусили інженерів болісно усвідомити неадекватність аналізу статичних сил та необхідність пояснення несподіваних ефектів взаємодій на однакових частотах.

.

Розділ 1. АНАЛІЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Основні теоретичні відомості. Основні типи резонансу

Нас оточує море різних частот, як природних, і штучних джерел. Ці частоти модулюються або відскакують через явище, відомого як резонанс. Резонанс фактично змушує хвилі мати однакову частоту і, таким чином, призводить до більш високої амплітуди, що означає більшу інтенсивність.

Галілео Галілей помітив, що одна людина могла зателефонувати у великий дзвін і дати поштовх у потрібний момент, причому вони були настільки великі, що чотири-шість людей вставали з землі і намагалися вловити імпульс, що тримається за мотузку. Це виправдовує ранні зустрічі з тим, на що здатний резонанс.

Резонансний рівень — це стан системи, у якому виникає реакція величезної величини у відповідь зовнішній подразник, коли прикладений подразник має частоту, близьку до частоти системи. З фізичної точки зору резонанс відноситься до збільшення амплітуди вібрації в результаті періодично прикладеної сили, частота якої дорівнює або близька до основної або власної частоти динамічної системи. Ця частота, коли він виникає резонанс, відома як резонансна частота системи. Малі періодичні сили з частотою, близькою до частоти своїх коливань, запасають коливальну енергію, відповідальну за коливання великої амплітуди.

Резонанс виникає у всіх існуючих типах коливань, таких як квантові хвильові функції, електронний парамагнітний резонанс (ЕПР), механічний резонанс, електромагнітний резонанс, акустичний резонанс та ядерний магнітний резонанс (ЯМР).[8]

Це корисно у багатьох відношеннях, включаючи генерацію вібрації з бажаною частотою або відфільтрування певної частоти зі складної вібрації,

що містить багато частот. Резонанс можливий, коли тіло здатне зберігати та передавати енергію між різними станами та формами енергії. Деякі втрати відбуваються у міру проходження циклів. При малому демпфуванні резонансна частота приблизно дорівнює власній частоті, але у іншому має кілька різних резонансних частот. У повсякденному житті радіохвилі налаштовані створення резонансу для вибіркового прийому хвиль певних значень. Сучасний годинник також використовують резонанс для своїх механізмів хронометражу [1].

Механічний резонанс

Схильність механічної системи давати відгук із великою амплітудою, коли частота її коливань аналогічна до власної частоти системи, а не до інших частот. Деякими прикладами цього резонансу є поштовх гойдалок, рух маятника, рух камертону. У всіх цих випадках сила, яка прикладається для створення вібрації, повинна регулярно регулюватися, щоб відповідати власній частоті, щоб створити резонанс. Резонансна частота пружини:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

де,

m – маса пружини,

k- коефіцієнт жорсткості пружини.

Резонансна частота маятника знаходиться за формулою:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$$

де,

g-прискорення вільного падіння, l- довжина нитки маятника.

Акустичний резонанс

Коли динаміці є хвилі, частоти яких збігаються з однією з його власних частот, він посилює звук. Це акустичний резонанс. Це дуже важливий інструмент для майстрів, тому що багато акустичних інструментів, таких як гітарні струни, флейти та барабанні пластини, використовують резонатори. Це також пояснює здатність почути [8].

Електричний резонанс

Коли ємнісний опір та індуктивний опір у ланцюзі рівні, спостерігається електричний резонанс. Коли імпеданс між входом та виходом електричного ланцюга близький до нуля, а передавальна функція ланцюга дорівнює одиниці, це також електричний резонанс [1].

Оптичний резонанс

Коли 2 дзеркала, одне частково відбиває, а інше сильно відбиває, є частиною лазера, вони утворюють оптичний резонатор. Інтерферометри та деякі оптичні параметричні генератори використовують оптичні резонатори, тому що вони мають більш високий коефіцієнт якості, що пов'язане із меншими втратами енергії [3].

Лазери, що забезпечують посилююче середовище та зворотний зв'язок лазерного випромінювання за допомогою цих резонаторів [8].

Резонанс загасаючого генератора

Цей тип системи зустрічається в системах з пружинними масами, маятникових системах і багатьох інших схемах, що демпфірують, таких як схеми RLC.

Коли ми розглядаємо систему пружини та маси, що приводиться в дію зовнішньою синусоїдальною силою, ми можемо дійти до диференціального рівняння:

$$m\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} F_0 \sin(\omega t) - kx - c\frac{\partial x}{\partial t}$$

де,

x – усунення від середнього становища,

ω- кутова частота,

k- жорсткість пружини,

F_0- амплітуда руху,

m- маса.

Як альтернатива, ми можемо написати рівняння як:

$$\frac{m\partial^2 x}{\partial t^2} + 2\zeta\omega_0\frac{\partial x}{\partial t} + \omega_0^2 x = \left\{\frac{F_0}{M}\right\}\sin(\omega t)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – власна частота системи, $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ – коефіцієнт демпфування.

У багатьох випадках при ретельному та зосередженому аналізі резонансна частота виявляється майже відмінною від власної частоти. Але це не зовсім так у демпфованій системі. У демпфованій системі резонанс виникає, коли стаціонарна амплітуда велика в порівнянні з іншими частотами, і це може бути можливо на певній частоті, яка називається резонансною частотою. Резонансна частота тут буде:

$$\omega_r = \omega_0\sqrt{1 - 2\zeta}$$

Тут резонансна частота не дорівнює незатухаючому кутовий частоті генератора.[6]

1.2 Резонанс у лінійних системах

Резонанс – відома концепція аналізу лінійних систем. При резонансі частота рушійної сили збігається зі своєю частотою системи, тому передача енергії ефективна, і амплітуда коливань може бути великий. Вивчення резонансів важливе у багатьох галузях техніки. Наприклад, при проектуванні машинобудування та будівництва, при проектуванні транспортних засобів, при проектуванні підшипників ротора парової турбіни, при проектуванні мостів та при проектуванні ізоляторів для контролю вібрації. Розуміння резонансів важливе для забезпечення правильного функціонування та бажаної поведінки систем. Майже всі резонансні дослідження вважають систему лінійною. Проте в техніці багато динамічних систем мають нелінійні компоненти, які не можна просто описати лінійною моделлю. Наприклад, важливою частиною цих систем є елементи, що вібрують, із зазорами і кінцевими упорами або вібруючі деталі, пошкоджені втомою, які викликають різкі зміни коефіцієнтів жорсткості і демпфування. Нелінійні генератори широко використовуються вивчення таких нелінійних систем [2].

Наприклад, білінійний осцилятор, кусочно-лінійний осцилятор і кубічний осцилятор жорсткості часто використовуються для опису зміни жорсткості залежно від умов експлуатації. В інженерній практиці та лабораторних дослідженнях резонансні явища спостерігаються й у нелінійних системах. Відзначено, що при збудженні частота становить половину власної частоти об'єкта, що тріснув, коливання часто стають великими. Резонанс на власній частоті аналогічний резонансу лінійної системи, але резонанс на половині власної частоти - це явище, унікальне для нелінійних систем і відоме як вторинний резонанс. Крім того, у системі з нелінійною жорсткістю також спостерігався резонанс на одній третині власних частот [2].

Важливість резонансу для лінійних систем добре відома і явища резонансу спостерігалися у нелінійних системах, дивно, що немає еквівалентних понять резонансів та резонансних частот для нелінійних систем. На відміну від лінійних систем, де динамічні властивості можна просто описати частотною характеристикою системи (АЧХ), опис динамічних властивостей нелінійних систем набагато складніший. Поглиблене вивчення питання про резонанси та резонансні частоти для нелінійних систем утруднено тим, що немає інструментів, здатних вирішити проблеми всіх нелінійних систем. Функції нелінійної вихідної частотної характеристики (ФНВЧХ) є новою концепцією. запропоновані авторами. Цю концепцію можна як розширення класичної частотної характеристики лінійних систем на нелінійний випадок. Нелінійні вихідні частотні характеристики - це одномірні частотні функції, які дозволяють виконувати аналіз нелінійних систем так само, як і аналіз лінійних систем, і забезпечують глибоке розуміння механізмів, що визначають багато видів нелінійної поведінки [3].

Концепція ФНВЧХ недавно використовувалася вивчення передачі енергії. властивості білінійних осциляторів у частотній області, де результати виявили наявність резонансів у цьому класі осциляторів. У цій роботі з урахуванням концепції ФНВЧХ досліджуються резонансні явища для класу нелінійних систем, які можна описати моделлю нелінійної жорсткості поліноміального типу. Аналізується демпфуюча дія на резонанси та резонансні частоти. Результати корисні вивчення перенесення енергії. явища для цього класу нелінійних систем та вивчення ефектів нелінійної поведінки демпфування. Ці висновки є важливими для проектування та усунення несправностей. Діагностика механічних систем та конструкцій, які можуть бути описані нелінійною моделлю [4].

1.3 Резонанс нелінійної системи

Нелінійні системи широко поширені у природі. Їх динаміка була досліджена дуже широко, частково через їхню міждисциплінарну застосовність, починаючи від усіх областей фізичних та математичних наук, закінчуючи інженерією, науками про життя та медициною. Під дією зовнішніх сил нелінійні системи можуть виявляти безліч цікавих та важливих властивостей, однією з найпомітніших з яких є резонанс. За наявності другої, вищої частоти, рушійної сили, чи то стохастичної чи детермінованої/періодичної, виникає явище резонансу, яке зазвичай можна назвати стохастичним резонансом або вібраційним резонансом. Робота системи в резонансі або поза резонансом обіцяє застосування у кількох передових технологіях, таких як створення нових матеріалів у нано-, мікро- та макромасштабах, включаючи, крім іншого, матеріали з фотонною забороненою зоною, квантовий контроль атомів та молекул, а також мініатюрні системи конденсованих середовищ. Частково мотивований цими потенційними додатками цей тематичний випуск, що складається з двох частин, містить конкретний сучасний огляд вібраційних і стохастичних резонансів в керованих нелінійних системах. У ньому зібрані сучасні оригінальні матеріали про такі індуковані резонанси, що стосуються їх аналізу, виникнення та застосування або з теоретичної, чисельної чи експериментальної точок зору, або з їх комбінацій [5].

Нелінійність - це невід'ємна властивість, що визначає поведінку багатьох природних та технологічних систем. Відомо, що на додаток до нелінійності на ці системи впливають зовнішні фактори, такі як рушійні сили, чи це стохастичні/шумові або детерміновані/періодичні за походженням. Вплив рушійних сил на нелінійні системи може викликати безліч інтригуючих та потенційно корисних явищ, одним з яких є резонанс,

явище у фізиці, спочатку пов'язане з узгодженням власної частоти вібрації системи з частотою зовнішньої сили, що рушить її, або узгодження двох або більше частот у системі, що зрештою призводить до посилення вихідного сигналу [5].

Розвиток досліджень явищ резонансу показало, що у більшості динамічних систем резонанс може виявлятися та інших формах, необов'язково пов'язані з узгодженням частот. Таким чином, визначення резонансу було узагальнено шляхом послаблення цього обмеження та включення всіх відомих процесів, що ведуть до посилення, придушення або оптимізації відгуку системи шляхом зміни/обурення/модуляції будь-якої властивості системи. Про резонанс у його великій різноманітності форм повідомлялося в широкому діапазоні систем, від біологічних до хімічних та фізичних систем, а також механічних та інженерних систем. Наприклад, у фізичних та хімічних системах атомна та молекулярна спектроскопія, можливо, є одним з найбільш яскравих проявів резонансу, коли енергія фотонів змінюється таким чином, що вона відповідає різниці в енергіях двох рівнів частинок і, отже, призводить до появи гострих піків [5].

На ядерному рівні резонанс виникає у процесах розсіювання електронів та багатьох частинок. У всіх цих хімічних та ядерних процесах реактивні резонанси виявляються як квазізв'язані стани або тимчасово короткоживучі хімічні частинки, і вони можуть виникати з енергетичних ям у коливально-адіабатичних потенціалах. Реактивний резонанс важливий, тому що він може значно підвищити ймовірність реакції.

У серцево-судинній системі (ССС) може виникнути резонанс за участю:

• серцевий генератор на частоті 1 Гц;

• дихальні коливання частотою 0,2 Гц;

• міогенні коливання на частоті 0,1 Гц;

• нейрогенні процеси та барорефлекси судинного тонусу (ТЗ) на частоті 0,03 Гц, що зумовлюють затримку відповіді СТ на зміну АТ на ≈ 15 с;

• NO-залежні та NO-незалежні ендотеліальні коливання близько 0,01 Гц, які вказують на здоров'я ендотелію, від якого залежить імунна система.

Оскільки вони є частинами пов'язаної системи, ці коливання взаємно модулюються. Вони проявляються в багатьох різних фізіологічних параметрах, наприклад артеріальному тиску та кровотоку, і всі вони потенційно застосовні у клінічних науках. У механічних системах виникнення резонансу іноді небажане, оскільки воно може мати руйнівний вплив на цілісність конструкції, що призводить до механічної відмови [6].

Отже, розуміння частотного режиму чи простору параметрів, у якому виникає резонанс в механічних пристроях, бажано інженерних додатків. У деяких інших випадках механічний резонанс можна позитивно використовувати для певних цілей, включаючи, крім іншого, підвищення ефективності машин, таких як машини для резонансного буріння, зниження кількості енергії, необхідної для підтримання стійких коливань у віброконвеєрах, масивний збір енергії, яка зазвичай може бути в кілька разів більша, ніж енергія збудження, отримана за допомогою безперервних джерел живлення. Коли в нелінійній системі виникає резонанс, його називають нелінійним резонансом, що характеризується сильною залежністю максимального відгуку системи від властивостей зовнішньої рушійної сили [6].

Нелінійний резонанс відіграє фундаментальну роль у розвитку нестійкості та мультистійкості у коливальних системах. Зазвичай нелінійний

резонанс розглядається одночастотного впливу. Нещодавно було показано, що резонансоподібні явища можуть виникати, коли на систему впливає комбінація гармонійних детермінованих рушійних сил [6].

У разі двочастотної детермінованої дії резонанс проявляється як посилення та оптимізація максимального відгуку системи на низькій частоті (НЧ) за рахунок наявності високочастотної (ВЧ) зовнішньої рушійної сили. Хоча концепція резонансів у керованих системах виникла з фізики та математики, її застосування у різних дисциплінах, таких як інженерія управління, неврологія, зв'язок, обробка зображень та медицина, послужили мотивом для тематичного випуску. Таким чином, тематичний випуск частково спрямовано створення майданчика для взаємного збагачення ідеями [6].

Шум або випадкові сили, з одного боку, протягом дуже довгого часу вважалися перешкодою для системи через їхню здатність спотворювати сигнали, що обробляються. Ця думка зберігалася до 1981 р., коли Бензі та ін показали, що шум дійсно може надавати нелогічне, але позитивний вплив на нелінійні системи за рахунок резонансного посилення слабких сигналів.

Ці спільні ефекти, викликані шумом чи посилені шумом, призводять до посилення реакції системи на слабкий періодичний керуючий сигнал, званий стохастичним резонансом, з тих пір привернули велику увагу дослідників. Інтерес до SR мотивований його численними природними та технологічними програмами, такими як виявлення слабких сигналів, виявлення несправностей машин, фільтрація якості зображення та покращення збору енергії. Стохастичний резонанс, як правило, характеризується появою похилої дзвонової кривої, коли відношення сигнал/шум або коефіцієнт посилення відображаються в залежності від зміни інтенсивності шуму [7].

З іншого боку, детерміністичні рушійні сили, такі як ВЧ-гармонічні сили, можуть ефективно замінити роль, яку відіграють стохастичні впливи, індукуючи оптимальну реакцію на НЧ-сигнал, тим самим також створюючи похилу дзвонову криву відгуку з таким же резонансом, як і у випадку явище СР. Цей ефект, тепер відомий як вібраційний резонанс (ВР), було запропоновано 20 років тому Ландою та МакКлінтоком. На малюнку зображені типові коливання позиційно-залежної системи мас під дією двочастотних сил призводять до появи резонансних піків у вигляді гребенеподібних «пагорбів», витягнутих вздовж значення параметра нелінійності маси λ і поширюються по обох площині параметрів. Паралельно з SR ретельно досліджувалась VR, оскільки в інженерних додатках використання гармонійних рушійних сил доцільніше і легко реалізовується, зокрема, для операцій логічного управління [7].

Крім того, гармонійні рушійні сили здатні забезпечувати більш короткі часи перемикання та ширший діапазон оптимальних параметрів, що необхідно для практичного підвищення надійності та швидкодії технічних систем. Оскільки віртуальна реальність була вперше запропонована два десятиліття тому, з'явилося багато наукових публікацій про це явище в різних наукових контекстах, розкиданих з широкого кола журналів.

Деякі з недавніх розробок в області VR і SR дуже цікаві і включають логічні, ентропійні, анти- і примарні VR/SR. Більш того, застосування VR набирає обертів у різних дисциплінах та широкому спектрі його проявів та додатків, пов'язаних із системами зв'язку, ідентифікацією вихідних сигналів, фільтрацією, оптимізацією та контролем, поділом та вилученням, а також безліччю передових та перспективних технологічних процесів. підвищення ефективності та умов експлуатації, в даний час повідомляється [1].

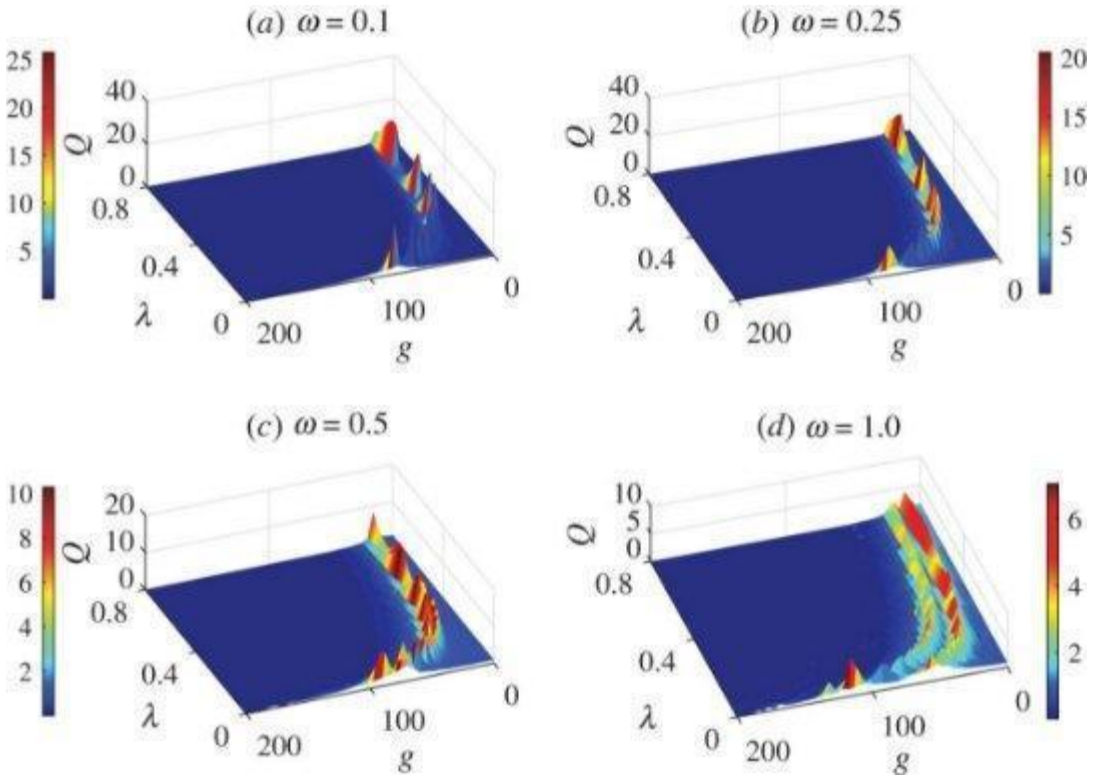


Рис.1.1 Типові коливання позиційно-залежної системи мас, що приводяться в дію двочастотними силами, що демонструють появу резонансних піків у вигляді гребенеподібних «пагорбів», витягнутих вздовж значень параметра нелінійності маси і поширюються по двох площинах.

Відгук системи розраховувався чисельно залежно від сили масової нелінійності і амплітуди високочастотного сигналу g при різних значеннях низькочастотного ω.

1.4. Експерименти Герца

На початку 1888 німецький професор Генріх Герц зацікавився статтею в науковому журналі. Він описав роботи англійських фізиків Кельвіна та Максвелла, які останніми роками дуже зацікавилися ним.

Ці два вчені пророкували і довели шляхом складних розрахунків, що якщо через пристрій проходить змінний струм або виникають змінні магнітні поля, такий пристрій випромінює енергію, а носіями є електромагнітні хвилі.

Максвел також виявив, що електромагнітні хвилі безперервно рухаються і змінюються в просторі - навіть у вакуумі - під дією як магнітних, так і електричних полів. Англійський фізик помітив, що ці електромагнітні хвилі поширюються з величезною швидкістю в триста тисяч кілометрів на секунду, тобто зі швидкістю світла, і що світло є особливим видом електромагнітних хвиль, що сприймаються нашими очима.

Не дивно, що професор Герц зацікавився відкриттям Максвелла. До речі, він не тільки прочитав про це, але й ухвалив важливе рішення: якщо розрахунки покажуть, що електромагнітні хвилі існують, він зробить усе, щоб довести це емпірично. Теорія електричних і магнітних явищ, розроблена найкращими математиками першої половини цього століття і прийнята донедавна майже всіма вченими, визнавала існування особливої невагомості електричних та магнітних рідин, що мають здатність панувати. відстань.[10]

Принцип ньютонівської теорії всесвітнього тяжіння - "дія на відстані" - залишався керівним принципом вчення про електрику та магнетизм. Але вже у 30-ті роки чудо-об'єкти Фарадея залишили питання про електрику та магнетизм, він висловив зовсім інші погляди на їхню зовнішню дію. Притягнення і відштовхування наелектризованих тіл, електризація ударом, взаємодія магнітів і струмів і, нарешті, індукційні явища Фарадея є далекосяжними прямими проявами властивостей електричних і магнітних рідин, лише безпосереднім електричним контактом зарядів, магнітів. або струми один з одним.

Це наслідки конкретних змін у стані існуючого середовища. Оскільки всі ці дії спостерігаються в тому самому вакуумі, а також у просторі, наповненому повітрям або іншими речовинами, повітря змінюється в результаті процесів електризації та намагнічування, Фарадей бачив причину цих явищ. Таким чином, подібно до того як поява особливих коливань ефіру і

перехід цих коливань від однієї частинки до іншої висвітлюють віддалений від неї предмет, в даному випадку тільки особливими обуреннями в ефірному середовищі і при передачі цих збурень від одного шару до іншого, поширюються всі електричні, магнітні та електромагнітні активності. Ця ідея була керівним принципом усіх досліджень Фарадея;

Що ще важливіше, це призвело його до всіх його знаменитих відкриттів. Але вчення Фарадея був безпосередньо заснований на науці найближчого майбутнього. За десятиліття найретельнішого та детального вивчення відкритих ним явищ основні ідеї Фарадея або ігнорувалися, або вважалися менш достовірними та недоведеними. Лише у другій половині 1960-х років з'явився передчасно померлий талановитий наступник Фарадея Клерк Максвелл, який пояснив та розвинув теорію Фарадея і надав їй строгий математичний характер. Максвелл показав необхідність обмеження швидкості передачі дії електричного струму або магніту через проміжне середовище, швидкості, яка, за Максвеллом, повинна дорівнювати швидкості світла в середовищі.

Середовищем, що у проведенні електричних і магнітних впливів, може бути трохи більше ефіру, дозволеного теоретично світла і променистого тепла. Процес поширення електричних та магнітних впливів у просторі має бути якісно ідентичний процесу поширення світлових променів. Усі закони, що стосуються світлових променів, повністю застосовні і до електричних променів. Згідно з Максвеллом, саме явище світла є електричним явищем. Світловий промінь є серією електричних коливань дуже малих електричних струмів, які послідовно проходять через середовище. Досі невідомо, які зміни у навколишньому середовищі пов'язані з електризацією тіла, намагнічуванням заліза або генерацією струму в обмотці. Теорія Максвелла ще дозволяє з точністю визначити характер передбачених їм деформацій. Це

лише достовірна зміна деформації середовища, що утворюється під впливом електризації тіл, з появою в цьому середовищі магнітних явищ і навпаки. Деформація під дією будь-якого магнітного процесу супроводжується збудженням Електричний ефект у навколишньому середовищі.[10]

Якщо в будь-якій точці деформованого середовища ми спостерігаємо електричну силу в певному напрямку, обумовлену електризацією тіла, тобто що дуже маленька електризована кулька, поміщена в даному місці, рухається в цьому напрямку, то деформація середовища для даного тіла збільшуються або зменшуються, магнітна сила діє у перпендикулярному напрямку - розташований тут магнітний полюс тисне у перпендикулярному напрямку.

Електрика-це результат теорії електричного струму Максвелла. Незважаючи на великий інтерес до вчення Фарадея-Максвелла, багато хто ставить його під сумнів. З цієї теорії вийшли надто сміливі узагальнення! Експерименти, опубліковані в 1888 (Генріх Герц), остаточно підтвердили правильність теорії Максвелла. Гурджієву, так би мовити, вдалося продати математичні формули Максвелла, практично він зміг довести існування електричного випромінювання, точніше, електромагнітного випромінювання. Відповідно до теорії Максвелла, поширення світлових променів є насправді поширенням електричних обурень, які послідовно виникають в ефірі і швидко змінюють напрямок.

Напрямок руху таких поштовхів, деформацій, за Максвеллом, перпендикулярно до самого світлового променя. Звідси випливає, що пряме збудження в будь-якому тілі електричного струму, який дуже швидко змінює напрямок, тобто збудження в змінному електричному провіднику і дуже короткочасне, має відбуватися в ефірі, що оточує цей провідник. викликає електричні обурення, що швидко змінюють напрямок, тобто має викликати явище, якісно подібне до світлових променів. Отже, ми давно знаємо, що

коли наелектризоване тіло або лейденська банка розряджаються в провіднику, в якому виникає розряд, народжується цілий ряд електричних струмів поперемінно в одному, то в іншому напрямку. Розрядне тіло не відразу втрачає потужність, навпаки, у процесі розряду воно кілька разів заряджається тим чи іншим знаком електричного струму. Наступні заряди в корпусі трохи менші. Ці ступені називаються. Давно відомо, що ціла серія електричних струмів генерується поперемінно то одну, то іншу сторону. Розрядне тіло не відразу втрачає потужність, навпаки, у процесі розряду воно кілька разів заряджається тим чи іншим знаком електричного струму. Наступні заряди в корпусі трохи менші. Ці ступені називаються. Давно відомо, що ціла серія електричних струмів генерується поперемінно то одну, то іншу сторону. Розрядне тіло не відразу втрачає потужність, навпаки, у процесі розряду воно кілька разів заряджається тим чи іншим знаком електричного струму. Наступні заряди в корпусі трохи менші. Ці ступені називаються вібраціями. Його можна розрахувати за формою та розміром розрядного тіла та провідника. Відповідно до теорії, ця тривалість електричних коливань (T) визначається формулою:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

де:

L – індуктивність котушки, C- ємність конденсатора.

Обидва виражаються у тому ж системі абсолютних одиниць. Тривалість електричних коливань і т. д. за допомогою простої лейденської банки, що розряджається через провід, що з'єднує дві поверхні. T виявляються через 100-10 мілісекунд. У своїх ранніх дослідах він електризував двома металевими сферами (діаметром 30 см) у різний спосіб і пропускав їх через короткий, трохи товстіший мідний стрижень, розрізаний

навпіл, де між сферами виникала електрична іскра. кінці двох половинок стрижня звернені один до одного. Рис. На рис. 1 показано схему досвіду Р. (діаметр стрижня 0,5 см, діаметр сфери). b і b ' рівні 3 см, відстань між намистинами приблизно 0,75 см, а відстань між центрами намистин у точці С' дорівнює 1 м) [10].

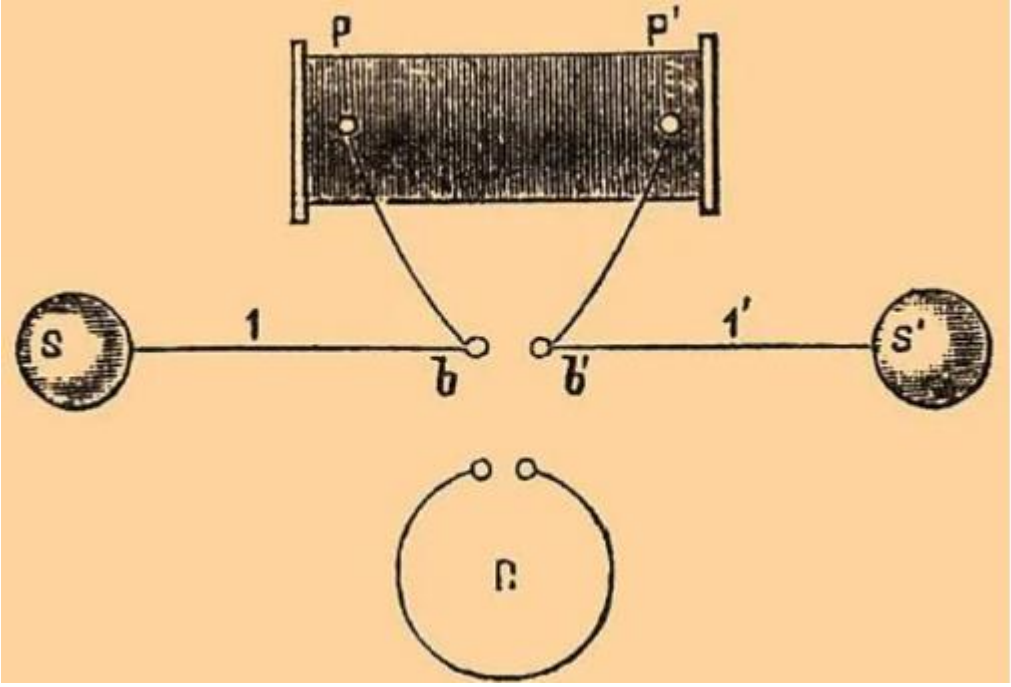


Рис.1.2. Схема дослідів із кулями

Пізніше замість куль стали використовувати прямокутні пластини (по 40 див із кожного боку), розміщені на площині. Завантаження таких кульок або листів проводилося за допомогою активної котушки Румкорфа. Кулі або листи завантажуються з котушки кілька разів на секунду, а потім видаляються поміщеним між ними мідним стрижнем, при цьому у просторі між сферами виникає електрична іскра. Б та Б'. При цьому тривалість електричних коливань у мідному стрижні трохи перевищувала 100 тис. за секунду.

На основі теорії періодичних збурень (хвиль) легко визначити швидкість повного електричного коливання вібратора за довжиною (l) та

часом (Т) «стоячої хвилі». (v) через які такі перешкоди передаються повітрям. Ця швидкість дорівнює v = 2 м.

У дослідах було визначено. l = 4,5 м, Т = 0,000000028. Отже, v = 320 000 км/с, що дуже близько до швидкості світла повітря. Максвелл, вивчав поширення електричних коливань у провідниках, т. е. проводах. Для цього паралельно вібруючою пластиною розташовувалась така ж ізольована мідна пластина, з якої виходив довгий горизонтально натягнутий провід (рис. 3) [12].

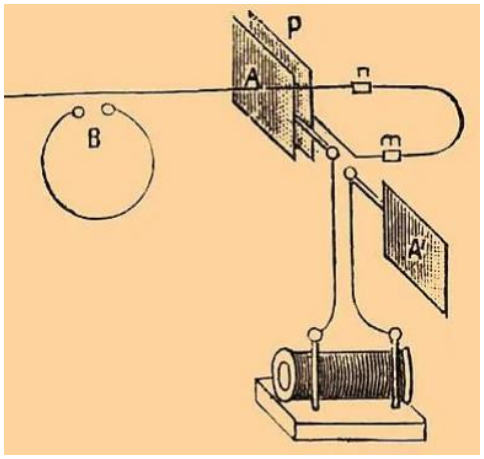


Рис. 1.3. Модель експерименту

У цьому дроті також генерувалися «прямі хвилі» внаслідок відображення електричних коливань від його ізольованого кінця, поширення його «вузлів» та «пучностей» за допомогою резонатора. знайшов уздовж дроту. З цих спостережень Р. вивів значення, що дорівнює 200 000 км/с, для швидкості поширення електричних коливань у провіднику. Але це визначення неправильне. По теорії Максвелла, у разі швидкість має бути такою самою, як у повітрі, тобто. дорівнює швидкості світла повітря. (300000 км в секунду) [9].

Джерелом електромагнітних хвиль, вібратором і приладом, що виявляє ці хвилі, Герц, за допомогою резонатора довів, що ці хвилі, як і світлові,

також відбиваються і переломлюються і що електричні збурення у цих хвилях перпендикулярні до напряму. їх поширення, т. год. Поляризація була виявлена в електричних променях. Для цього до фокальної лінії параболічного циліндричного цинкового дзеркала, що передає дуже швидкі електричні коливання, підключається вібратор (вібратор, що складається з двох коротких циліндрів), а фокальної лінії іншого дзеркала аналогічно підключається резонатор. до описаного вище. два прямі дроти. Спрямовуючи електромагнітні хвилі з першого дзеркала на металевий плоский екран, Герц. зміг визначити закони відображення електричних хвиль іншим дзеркалом, змусивши ці хвилі пройти через велику асфальтову призму та визначити їхнє заломлення. Закони відображення та заломлення виявилися такими ж, як і у світлових хвиль. За допомогою цих дзеркал поляризуються електричні промені. При паралельності двох протилежних осей дзеркала у резонаторі під дією вібратора спостерігаються іскри. Якщо одне із дзеркал повернути на 90° у напрямку променя, тобто якщо осі дзеркал перпендикулярні один одному, іскрові сліди в резонаторі зникнуть [9].

РОЗДІЛ 2. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЗОНАНСУ НА РОБОТАХ ПРОФЕСОРА П.Н ЛЕБЕДЄВА

2.1. Пондеромоторні сили

Пондеромоторні сили - загальний термін для сил, що діють на електричні заряди, що призводять до усунення пов'язаних з ними мас. У разі просторового розподілу заряду використовується густина пондеромоторної сили. Перш ніж перейти до математичних основ вагові сили, необхідно коротко пояснити, що таке вагові сили [12].

На рис. 2.1 і 2.2 показані результати двох симуляцій, у яких досліджувалося зміна положення позитивного та негативного точкових зарядів у змінному полі, яке було однорідним лише у напрямі x з часом. Сила електричного поля будь-якої миті часу вказана стрілками на задньому плані. Інтегруємо у напрямі t, середнє значення напруженості поля за часом виявляється рівним нулю у кожній точці [12].

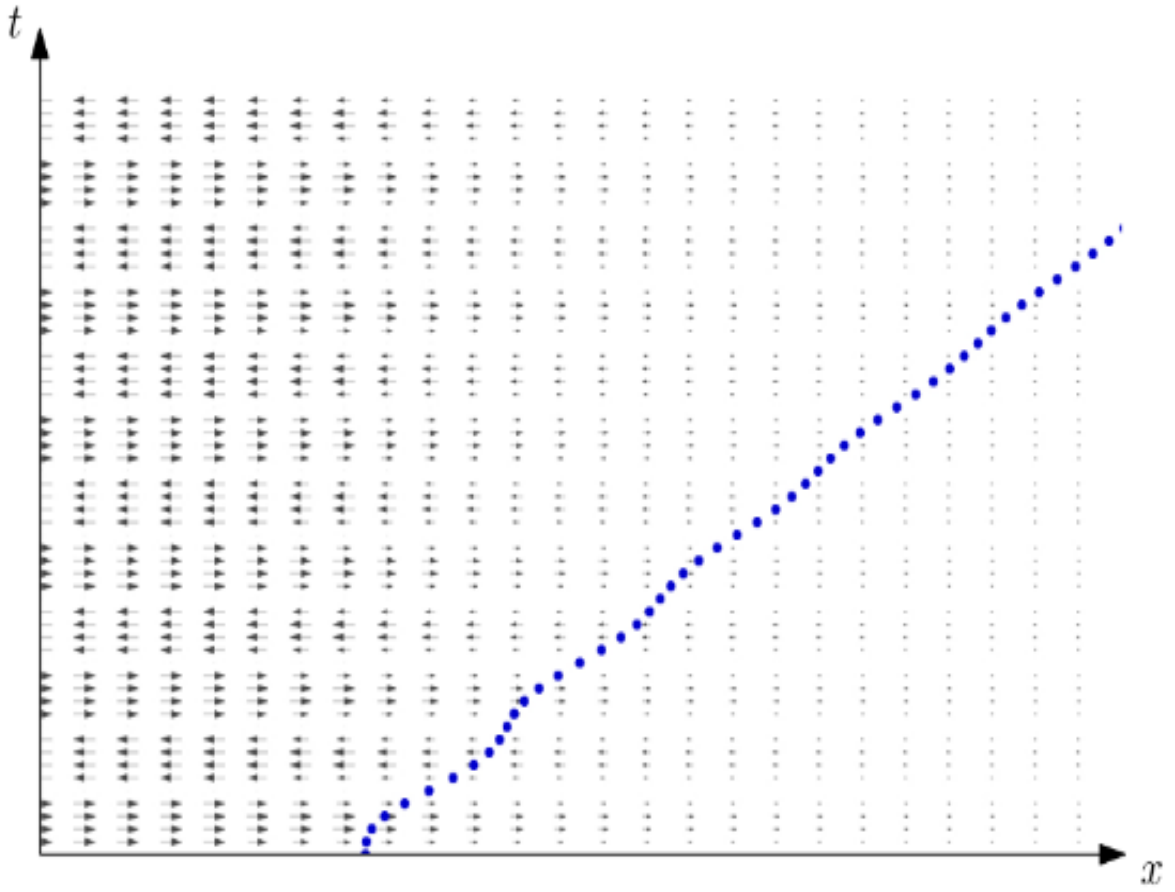


Рис. 2.1. Лінія переміщення позитивного точкового заряду в змінному полі з неоднорідністю в напрямку x.

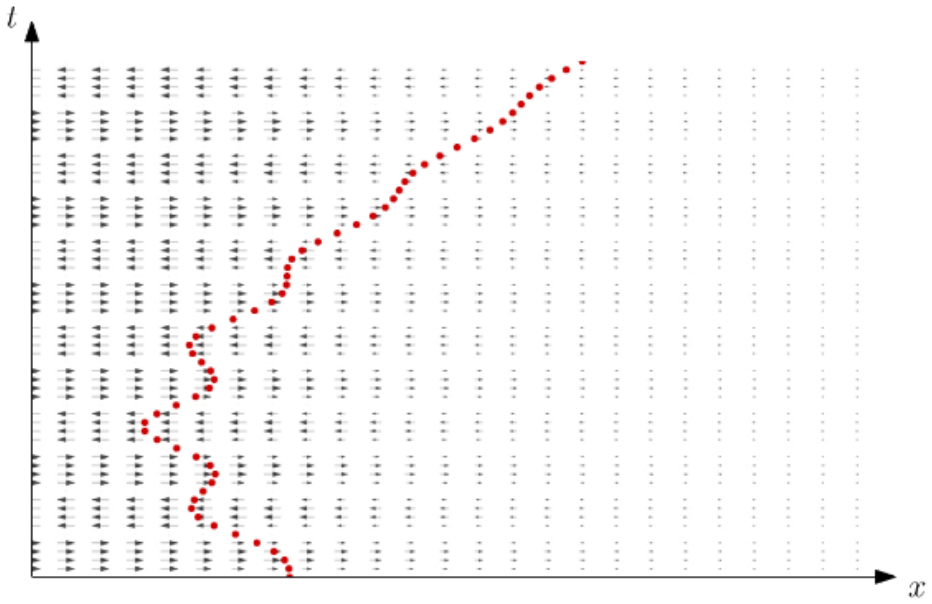


Рис. 2.2. Лінія переміщення негативного точкового заряду в змінному полі з неоднорідністю в напрямку x.

Незважаючи на це, наприкінці симуляції обидві точкові навантаження виявляються праворуч від того місця, де вони були на початку симуляції, незалежно від знаку навантаження. Підсумовуючи, можна сказати, що електрично заряджені частинки, незалежно від знаку заряду, завжди притягуються в той бік, у якому слабшає напруженість поля. Цей ефект називається обтяжливою силою. Причину такої поведінки легко пояснити: ми припускаємо, що сила притягує зараз. Потім частка рухається туди, де напруженість поля стає ще більшою [11].

Якщо після цього змінити напруженість поля на протилежну, частка опиниться у точці, де сила відштовхування тепер більше, ніж вихідна. Тому до наступної зміни полярності частка рухається трохи далі в області, де амплітуда напруженості поля мала. З кожною зміною полюсів цей процес повторюється знову і знову [11].

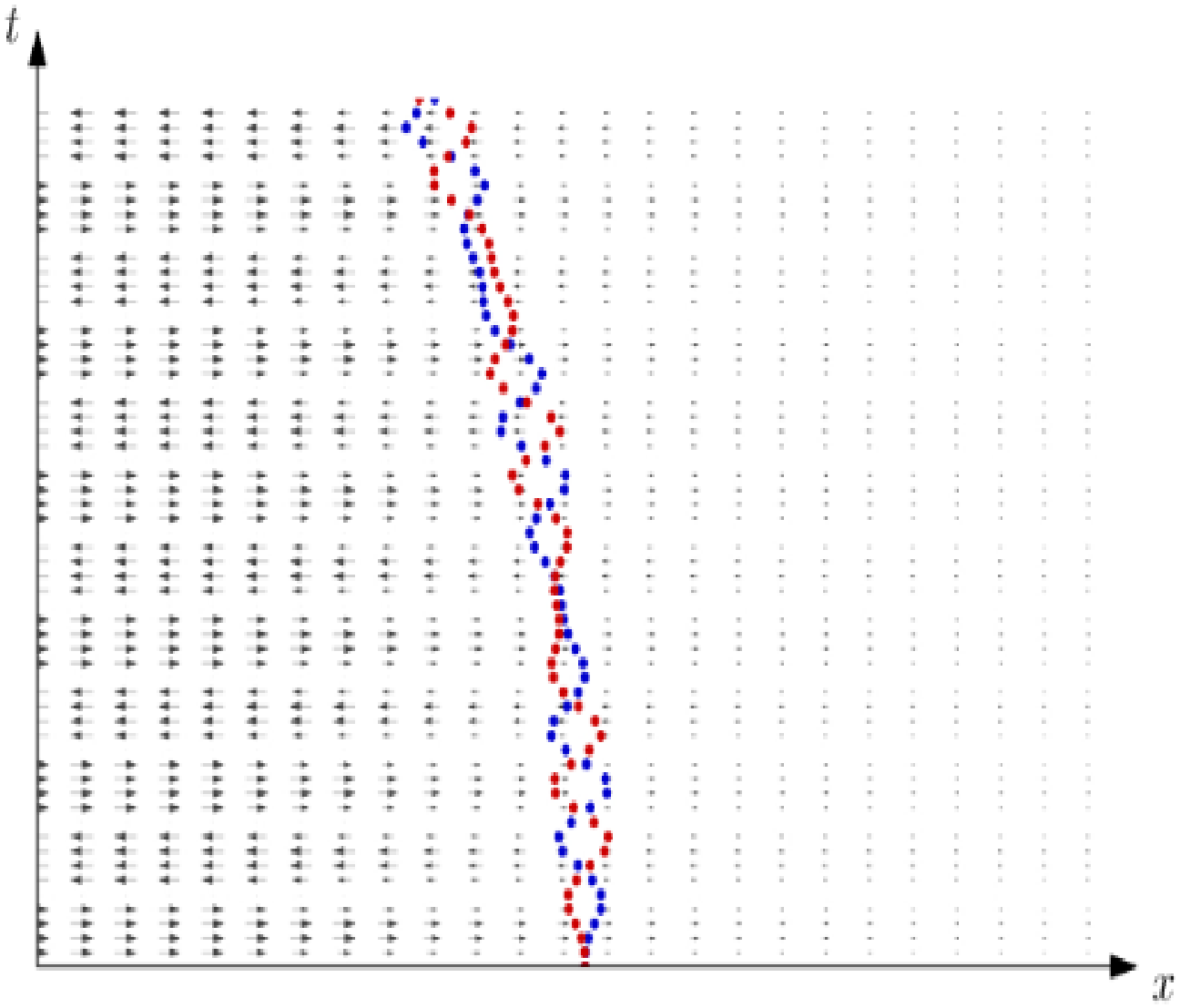


Рис.2.3. Лінія компонента пов'язаної частинки з сильним зв'язком у змінному полі.

Елементарні частинки у сенсі гравітаційної моделі краплі плазми якраз і є такими електрично нейтральними зв'язаними частинками. На рис. 2.3 та 2.4 показаний механізм.

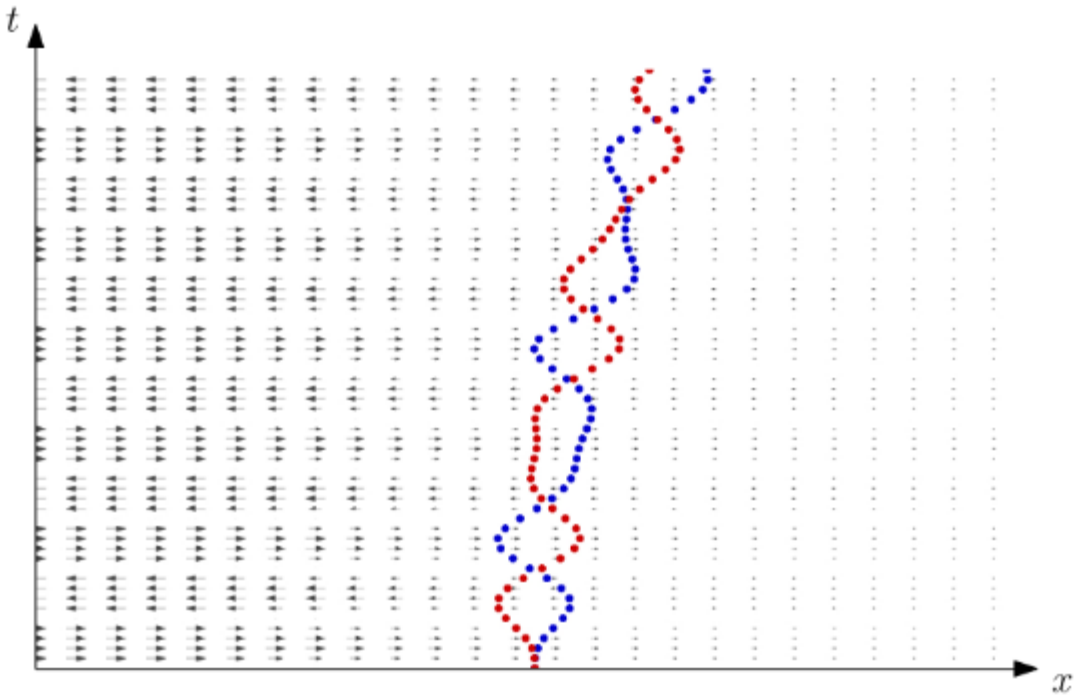


Рис. 2.4. Лінія компонент пов'язаної частинки зі слабким зв'язком у змінному полі.

Виявляється, пов'язана частка може рухатися в обох напрямках. Напрямок залежить від типу та сили зв'язку у зв'язаній частинці. У разі гармонійного зв'язку зі слабкою константою зв'язку область високої напруженості поля є відштовхуючим. Однак у разі сильного зв'язку пов'язана частка втягується в область високої напруженості поля. Кордон між сильним та слабким визначається власною частотою зв'язаної частинки та частотою поля [11].

Змоделюємо осцилююче, просторово-неоднорідне електричне поле $\vec{E}$ через вираз:

$$\vec{E}\,(\vec{r},t) = \overrightarrow{E_r}(\vec{r})\cos(\omega t) \tag{1}$$

Рівняння руху:

$$\frac{m}{q}\vec{r} = \vec{E}\,(\vec{r}, \ddot{t}) = \overrightarrow{E_r}\,(\vec{r})\cos(\omega t) \tag{2}$$

Якщо кутова частота передбачається дуже великою, звідси випливає, що амплітуда коливань дуже мала, отже:

$$\overrightarrow{E_r}\,(\overrightarrow{r_d} + \overrightarrow{r_o}) \approx \overrightarrow{E_r}(\overrightarrow{r_d}) + \nabla \otimes \overrightarrow{E_r}(\overrightarrow{r_d}) \cdot \overrightarrow{r_o} \tag{3}$$

Де $\overrightarrow{r_o}$ – ділянка кривої, що коливається, $\overrightarrow{r_o}$ – дрейфуючий ділянку кривої.

$$\nabla \otimes \vec{E} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial r_x}E_x & \frac{\partial}{\partial r_y}E_x & \frac{\partial}{\partial r_z}E_x \\ \frac{\partial}{\partial r_x}E_y & \frac{\partial}{\partial r_y}E_y & \frac{\partial}{\partial r_z}E_y \\ \frac{\partial}{\partial r_x}E_z & \frac{\partial}{\partial r_y}E_z & \frac{\partial}{\partial r_z}E_z \end{pmatrix} \tag{4}$$

Позначає матрицю Якобі. Якщо ми підставимо це на рівняння руху, то отримаємо:

$$\frac{m}{q}(\dddot{\overrightarrow{r_d}} + \ddot{\overrightarrow{r_o}}) \approx (\overrightarrow{E_r}(\overrightarrow{r_d}) + \nabla\overrightarrow{E_r}\big(\overrightarrow{E_r}(\overrightarrow{r_d}) \cdot \overrightarrow{r_o}\big)\cos \otimes(\omega t) \tag{5}$$

У наступному кроці, використовуємо той факт, що прискорення $\ddot{\overrightarrow{r_d}}$, що призводить до дрейфового руху, набагато менше прискорення$\ddot{\overrightarrow{r_o}}$. При цьому і через малу амплітуду коливань $\overrightarrow{r_o}$ апроксимація випливає з рівняння руху.

$$\frac{m}{q}\,\ddot{\overrightarrow{r_o}} \approx \overrightarrow{E_r}\big(\overrightarrow{E_r}\big)\cos(\omega t) \tag{6}$$

Оскільки $(\overrightarrow{r_d})$ змінюється дуже повільно порівняно з $\overrightarrow{r_o}$, $\overrightarrow{E_r}(\overrightarrow{r_d})$ є по суті константою в періоді, що дозволяє вирішити диференціальне рівняння. Виходить:

$$\overrightarrow{r_o} \approx -\frac{q}{mw^2}\overrightarrow{E_r}(\overrightarrow{r_d})\cos(\omega t) \tag{7}$$

Підставляючи рівняння (5), отримуємо:

$$\frac{m}{q}\left(\ddot{\overrightarrow{r_d}} + \frac{q}{m}\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right)\cos(\omega t)\right) \approx$$

$$\approx \left(\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right) - \frac{q}{mw^2}\nabla\otimes\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right)\cdot\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right)\cos(\omega t)\right)\cos(\omega t) \tag{8}$$

$$\ddot{\overrightarrow{r_d}} \approx -\frac{q^2}{m^2\omega^2}\nabla\otimes\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right)\cdot\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right)\cos(\omega t) \tag{9}$$

Можно спростувати. Член $\cos(\omega t)^2$ забезпечує внесок у середньому за часом

$$\cos(\omega t)^2 = \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T \cos(\omega t)^2 dt = \lim_{T\to\infty}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4T\omega}\sin(2\omega T)\right) = \frac{1}{2} \tag{10}$$

З наближення випливає що:

$$\ddot{\overrightarrow{r_d}} \approx -\frac{q^2}{2m^2\omega^2}\nabla\otimes\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right)\cdot\overrightarrow{E_r}\left(\overrightarrow{E_d}\right) \tag{11}$$

Розраховуємо пондеромоторну силу за рівнянням:

$$\overrightarrow{F_p} = -\frac{q^2}{2m^2\omega^2}\nabla\otimes\overrightarrow{E_r}\cdot\overrightarrow{E_r} \tag{12}$$

Виражаємо $\overrightarrow{E_r}$ як градієнт $-\nabla\varphi_r$

$$\nabla\otimes\overrightarrow{E_r}\cdot\overrightarrow{E_r} = \frac{1}{2}\nabla\left(\overrightarrow{E_r}\cdot\overrightarrow{E_r}\right) = -\frac{1}{2}\nabla E_r^2 \tag{13}$$

$$(\nabla\otimes\nabla\varphi_r)\cdot\nabla\varphi_r = \frac{1}{2}\nabla(\nabla\varphi_r\cdot\nabla\varphi_r) \tag{14}$$

Спрощуємо формулу і отримуємо:

$$\overrightarrow{F_p} = -\frac{q^2}{4m^2\omega^2}\nabla E_r^2$$

2.2 Вивчення резонансу професором П. М. Лебедєвим

Дослідженню цієї «складної нагоди» Лебедєв присвятив свою докторську дисертацію «Експериментальне дослідження пондеромоторної дії хвиль у резонаторах». Ця дисертація забрала у Лебедєва багато часу та сил. Він почав працювати над цією темою у 1894 році, де опублікував першу частину своєї роботи про дію електромагнітних хвиль. У 1896 р. вийшла стаття про дію гідродинамічних хвиль, у 1899 р. - стаття про дію акустичних хвиль. У 1899 р. Лебедєв опублікував усі три статті окремою брошурою, до якої випередив спеціальне «Вступ».

В 1900 за цю роботу, представлену як кандидатська дисертація, Лебедєв отримав ступінь доктора, минаючи ступінь магістра. Це була висока оцінка його роботи професорсько-викладацьким складом. Лебедєв починає своє «Вступ» із згадки про «геніальну роботу» Герца, яка «відкрила для дослідження безмежне поле явищ».

Лебедєв вказує, що робота Герца спрямована на вивчення джерел електромагнітного випромінювання і, отже, призводить до одного з найважчих питань сучасної фізики — до теорії молекулярних сил. "...Треба стверджувати, - пише Лебедєв, - що пондеромоторні сили існують між двома випромінюючими молекулами, як між двома вібраторами, в яких збуджуються електромагнітні коливання..." [11].

Лебедєв вивчення цих сил вивчає дію хвиль на коливальну систему. Така резонаторна система моделює молекулу. Вивчаючи дію електромагнітних хвиль на резонатор, Лебедєв досліджує окремо дію магнітного та дію електричного хвильового вектору. Магнітний осцилятор, що збуджується магнітним вектором падаючої хвилі, був мініатюрною котушкою з чотирьох витків срібного дроту, з'єднану з конденсатором з двох пластин, вирізаних у вигляді «печінків» квадрантного електрометра. Уся система була підвішена на чутливій підвісці.

Електричний резонатор складався з двох циліндричних квадрантів, зібраних з окремих алюмінієвих смуг, з'єднаних з котушкою самоіндукції із срібного дроту, підвішеного так, щоб магнітний вектор не міг викликати його замикання і на заряди конденсатора могли діяти лише електричні сили. Лебедєв показав, що закони пондеромоторної дії хвиль на магнітний та електричний резонатори ідентичні. Якщо частота коливань резонаторної системи вище частоти падаючої хвилі (частоти вібратора), вона притягається до вібратора, а нижче налаштований резонатор відштовхується. Притягнення змінюється відштовхуванням під час проходження через резонанс.

Далі Лебедєв досліджував вплив гідродинамічних хвиль, що збуджуються спеціальним вібратором, на гідродинамічний резонатор, що є куля на сталевій пружині. Тут він також виявив тяжіння на резонансних

частотах вище частоти вібратора та відштовхування у протилежному випадку, а також зміна тяжіння на відштовхування під час проходження через резонанс.

В останній частині своїх досліджень проф. Лебедєв присвятив себе акустичним хвилям. Тут також спостерігалися тяжіння та відштовхування залежно від співвідношення частот вібратора та резонатора, але лише у безпосередній близькості від вібратора. У міру віддалення від резонатора сили тяжіння зменшуються і досить великій відстані повністю зникають, залишаються тільки сили відштовхування, що досягають максимального значення при резонансі.

Проф. Лебедєв вважав, що виявлене ним тотожність пондеромоторних сил у таких різних явищах показує, що елементарні закономірності цих явищ повинні бути незалежні від природи хвиль і резонаторів, що їх сприймають. Це означає можливість поширення цих законів на область молекулярного випромінювання та взаємодії молекул. Проте Лебедєв зазначає, що «немає даних, що дозволяють сказати щось конкретне про властивості молекул резонатора» [11].

Дослідження проф. Лебедева про магнітний резонатор та його висновки показані вище в таблиці. Що стосується до знака при R, то (+) позначає таке обертання, при якому кут між силовими лініями поля резонатора і поля вібратора прагне зменшитися; таким чином, знак (+) відповідає притяганню між силовими лініями, тоді як знак (-) відповідає обертанню в зворотний бік, тобто. від штовхання між ними. Рис. 2.5 і 2.6 представляють графічне зображення пондеромоторних сил; по абсцисах віднесені λ , а по ординатам R; V позначає довжину хвилі вібратора [11].

Магнитный резонаторъ.

N	λ	RJ=180.
5	301 ± 2	+ 3,4 ± 0,4
4	311 ± 2	+ 3,8 ± 0,3
3	331 ± 2	+ 7,6 ± 0,4
2	340 ± 2,5	+ 14,8 ± 1,0
8	351 ± 2	+ 52,0 ± 3,0
1	371 ± 1,5	— 18,8 ± 0,6
7	389 ± 2	— 8,5 ± 0,2
6	414 ± 2,5	— 4,5 ± 0,3

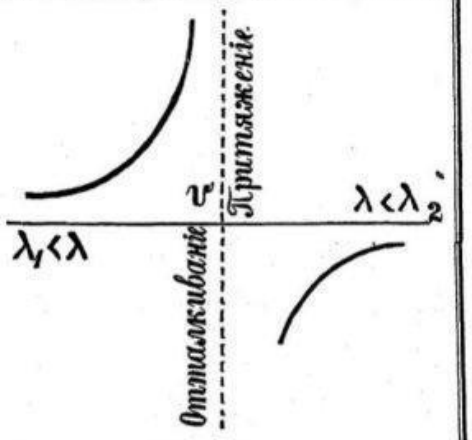


Рис. 9.

Длина волны магнитнаго вибратора v = 359 cm. ± 6.

Рис. 2.5. Пондеромоторна взаємодія для магнітного резонатору.

Электрическій резонаторъ.

N	λ	RJ=40.
7	283 ± 1	+ 7,6 ± 1,3
4	323 ± 1,5	+ 14,6 ± 0,5
6	333 ± 1,5	+ 19,5 ± 2,4
5	359 ± 2	— 22,6 ± 1,4
3	376 ± 2	— 15,7 ± 0,9
2	389 ± 1,5	— 8,1 ± 0,8
1	418 ± 1,5	— 4,7 ± 0,5

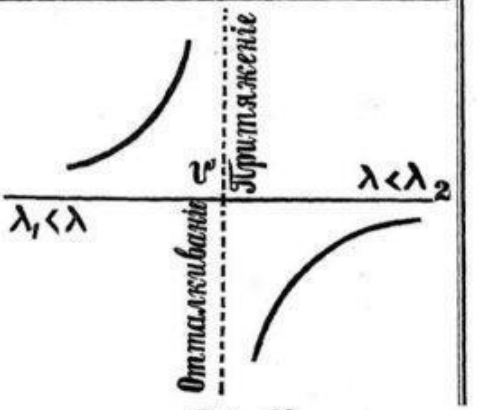


Рис. 10.

Длина волны электрическаго вибратора v = 346 cm. ± 5.

Рис. 2.6. Пондеромоторна взаємодія для електричного резонатору.

Результати вищенаведених спостережень можна сформулювати таким чином.

1. Закони пондеромоторного впливу хвиль на магнітні та електричні резонатори тотожні.
2. Коли резонатори налаштовані вище, то падаюча на них хвиля обертаємо їх так, щоб збудження їх збільшувалося; коли резонатори налаштовані нижче, то обертання тягне за собою зменшення збудження.
3. Найбільші величини цих протилежних сил мають місце в безпосередній близькості резонансу [11].

Проф. Лебедєв прийшов до такого висновку, що -"Всі спостереження, які я приводив при різних розташуваннях досвіду, вказують, що залежність пондеромоторної дії від резонансу у всіх випадках однакова; ось чому далі я наводжу лише дві серії спостережень (для поздовжніх і поперечних коливань). N позначає номер спостереження, і число повних коливань кульки в 1 хвилину, є величину кута повороту головки крутильних ваг; + позначає тяжіння резонатора осцилюючим кулі груди, а знаки - відштовхування".

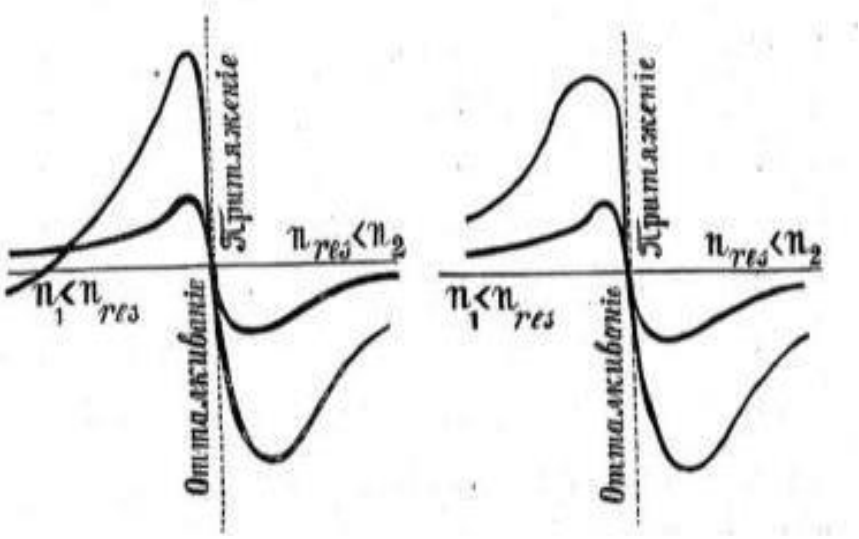


Рис. 2.7. Поведінка сили взаємодії в умовах резонансу

На рис. 2.7 графічно представлені поздовжні та поперечні коливання; по осі абсцис віднесені частоти коливань п осцилюючої кульки, а по осі ординати величини пондеромоторних сил за вимірами на крутильних вагах

РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Складання експериментального стенду

Для проведення експериментальних досліджень пондеромоторної взаємодії було придбано відповідні електронні комплектуючі та виготовлено оригінальний лабораторний стенд, який включає наступні елементи:

1) Регульований блок живлення в діапазоні 5-30 В з індикацією вхідної та вихідної напруги (Рис. 3.1, зліва),

2) Двоканальний підсилювач сигналу в діапазоні частот 1 - 20000 Гц з регулюваннями амплітуди сигналу (Рис. 3.1, праворуч),

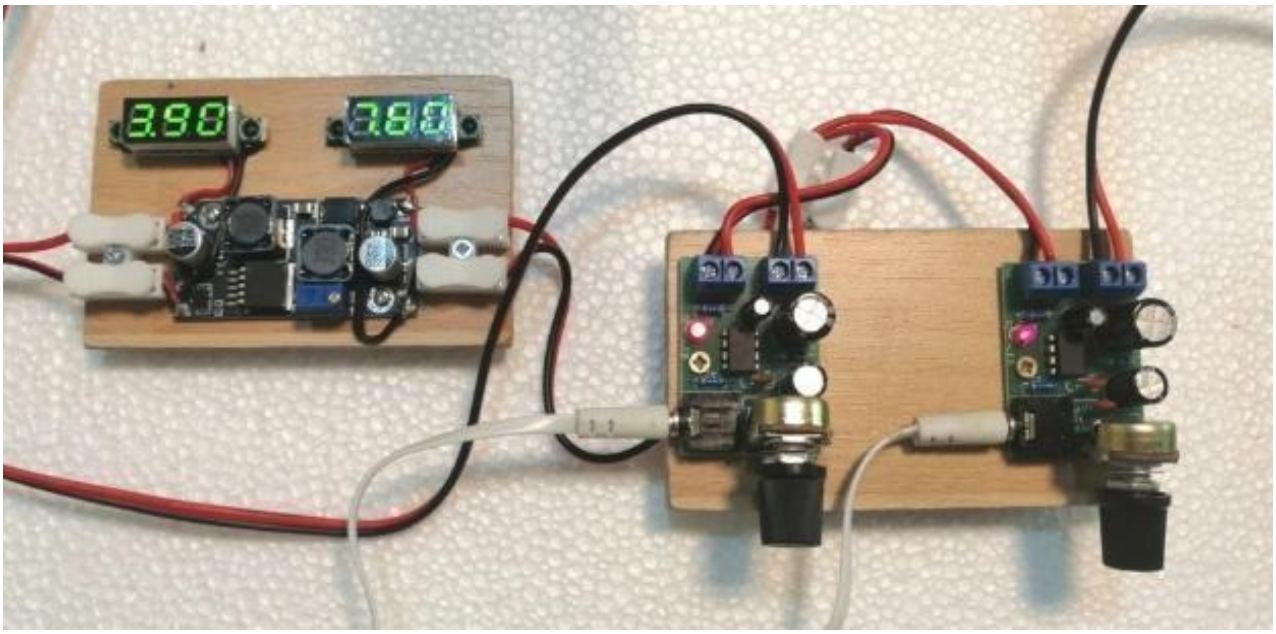


Рис. 3.1. Регульований адаптер живлення та двоканальний підсилювач сигналу

3) Штатив з об'єктом резонансного впливу, який було надруковано на кафедральному 3D принтері (Рис. 3.2). Як приймальна система застосовувалася легка тенісна кулька діаметром d = 39,2 мм (Рис. 3.2). Розрахункова резонансна частота кульки за н.у. складає

$$\gamma = \frac{v_{зв}}{2\ d} = 4337\ Гц.$$

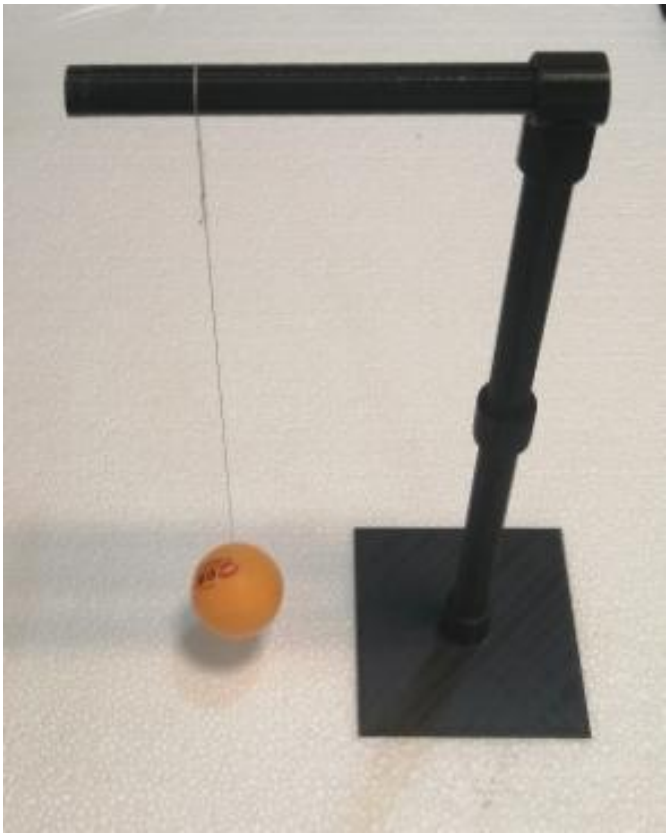


Рис. 3.2. Регульований штатив з об'єктом дослідження резонансу

4) Аудіо динаміки спрямованої дії (робоча частота 5-20000 Гц, чутливість 91 дБ, максимальна потужність 150 Вт, зовнішній розмір 85*85 мм), які були встановлені в кронштейні, також надруковані на 3D принтері (Рис. 3.3).

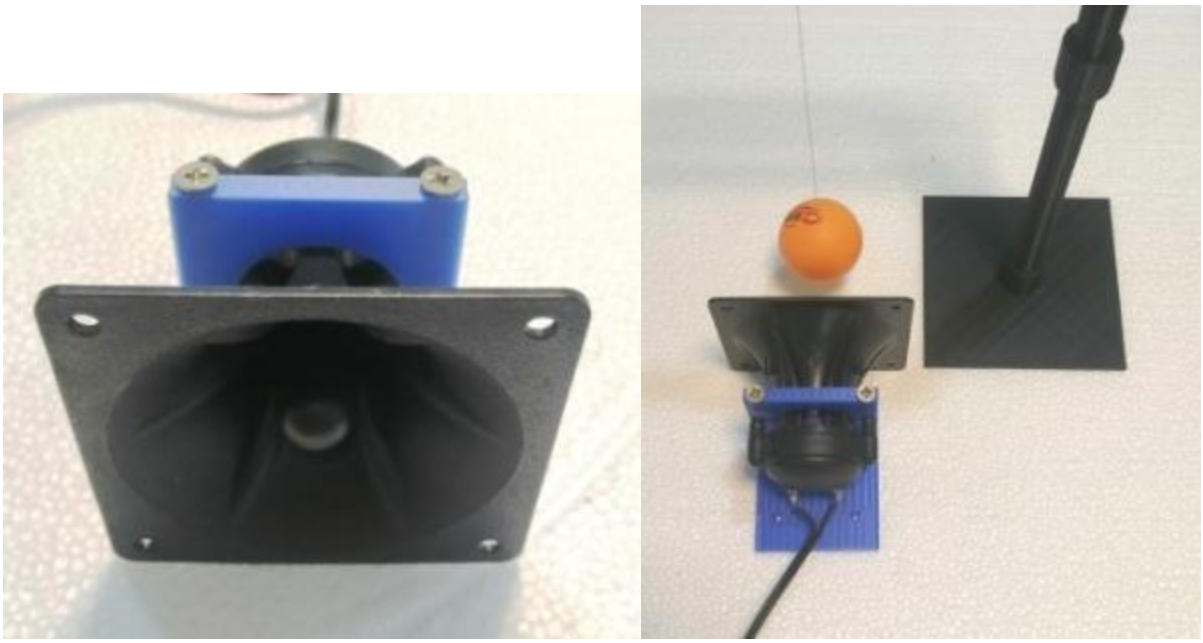


Рис. 3.3. Аудіо динамік з монтажем для акустичного впливу

5) Двоканальний цифровий генератор сигналів JUNTEK JDS2800 (Рис. 3.4), який має функціональні клавіші керування, представлені на Рис. 3.5.



Рис. 3.4. Двоканальний генератор сигналів довільної форми



Рис. 3.5. Функціональні клавіші керування генератором

Технічні параметри використовуваного цифрового генератора сигналів наведено на рис. 3.6.

General specifications		
Display	Display type	2.4 inch TFT color LCD display
Store and load	Quantity	100
	Position	00 to 99 (00 memory location parameter is loaded by default as power on)
Arbitrary wave	Quantity	1 to 60 total 60 groups (15 groups by default as power on)

Interface	Interface mode	USB to serial interface
	Communication speed	Adopt standard 115200bps
	Protocol	Using the command line, the protocol is made public
Power supply	Voltage range	DC5V±0.5V
Manufacturing technology	Surface mount technology, large-scale integrated circuits, high reliability, long service life	
Prompt tone	Users can turn on or off by setting program	
Operating characteristics	All key operations, knob continuous adjustment	
Environmental conditions	Temperature: 0~40 oC Humidity: <80%	

Рис. 3.6. Загальні технічні характеристики генератора

Частотні характеристики цифрового генератора представлені на Рис. 3.7.

Frequency characteristics			
	JDS2800 -15M	JDS2800 -40M	JDS2800 -60M
Sine wave frequency range	0~15MHz	0~40MHz	0~60MHz
Square wave frequency range	0~15MHz	0-25MHz	0-25MHz
Triangle wave frequency range			
Pulse wave frequency range	0~6MHz	0~6MHz	0~6MHz
TTL digital wave frequency range			
Arbitrary frequency range			
Pulse width adjustment range	100nS~4000S	40nS~4000S	25nS~4000S
Square wave rise time	≤25ns	≤10ns	≤10ns
Minimum frequency resolution	0.01uHz（0.00000001Hz）		
Frequency accuracy	±20ppm		
Frequency stability	±1ppm/3hours ±1ppm/3 hours		

Рис. 3.7. Частотні характеристики генератора

Загальний вигляд зібраного лабораторного стенду представлено на рис. 3.8.

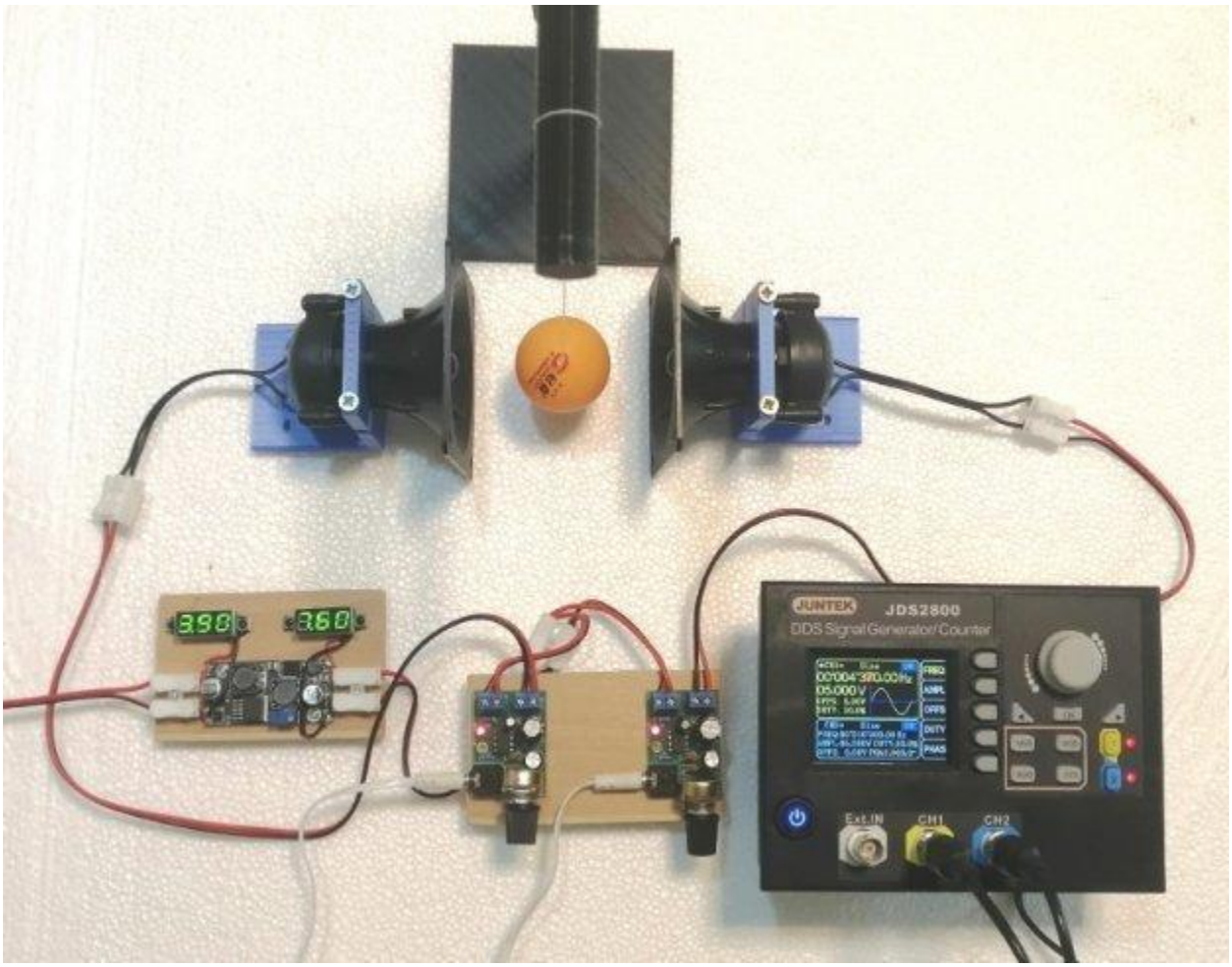


Рис. 3.8. Лабораторний стенд у зборі

3.2. Експериментальне дослідження поведінки системи в умовах резонансу

У процесі роботи експериментального стенду електромагнітний сигнал синусоїдальної форми з цифрового генератора, що задає, посилювався до необхідної амплітуди і подавався на випромінюючі акустичні системи, що складаються з одного або двох динаміків, описаних вище. Частота і амплітуда сигналу виставлялися з високою точністю відповідно до технічних характеристик задаючого генератору.

На першому етапі досліджень було визначено експериментально резонансну частоту досліджуваного фізичного об'єкта за максимальним відгуком системи, що склала 4385 Гц, що на 1,1 % відрізняється від теоретично розрахованої частоти.

На другому етапі було досліджено поведінку системи поблизу резонансу. При використанні одного динаміка як джерело акустичних коливань з загасаючою амплітудою в повітрі були дотримані умови для пондеромоторної взаємодії, оскільки об'єкт, що вивчається, опромінювався змінним акустичним полем з градієнтом інтенсивності.

При акустичній потужності джерела випромінювання на рівні 10-15 дБ при опроміненні досліджуваного об'єкта акустичним полем з частотою нижче резонансної в межах 1-2 %, об'єкт слабо притягувався до джерела поля, а при опроміненні акустичним полем з частотою вище резонансної в тих же межах об'єкт слабо відштовхувався. Ці ефекти повністю відповідають результатам проф. Лебедєва, який той одержав у своїх дослідженнях [11].

Особливий інтерес для дослідження представляв випадок пондеромоторного акустичного впливу на фізичний об'єкт поблизу резонансу з боку двох динаміків, розташованих з протилежних сторін об'єкта (Рис. 3.9).

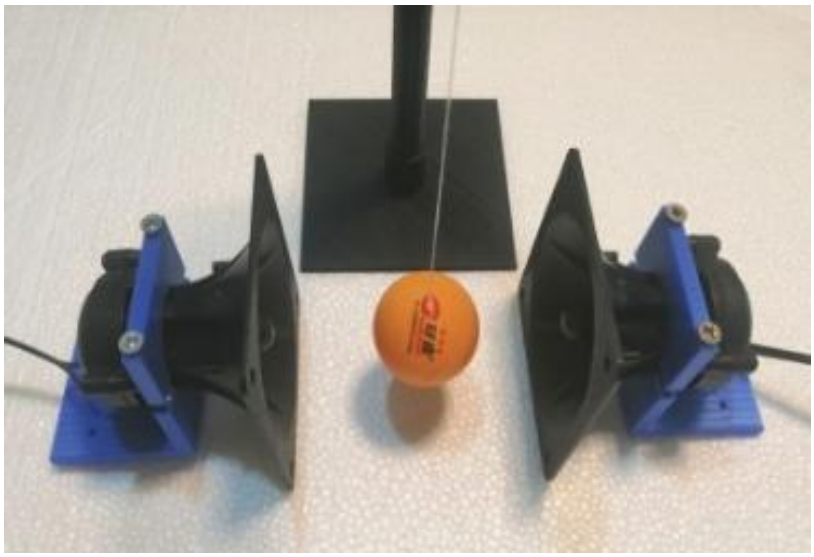


Рис. 3.9. Двосторонній акустичний вплив на об'єкт, що вивчається, в умовах резонансу

В цьому випадку, при опроміненні фізичного об'єкта на резонансній частоті симетрично з двох сторін, в ньому виникають сильні осциляції щодо положення рівноваги. Невеликі зрушення частоти джерел від резонансної ліворуч або праворуч від фізичного об'єкта, що вивчається, викликають биття в системі підвісу.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження дозволили встановити основні якісні закономірності в поведінці об'єкта, що вивчається, в полі пондеромоторних сил.

ВИСНОВКИ

Виконано теоретичне вивчення науково-технічної літератури у галузі резонансних явищ та нелінійної пондеромоторної взаємодії.

Проведено теоретичний аналіз особливостей пондеромоторної взаємодії та способів її математичного опису.

Розроблено та зібрано оригінальний лабораторний стенд для проведення експериментальних досліджень пондеромоторної взаємодії.

Виконано експериментальне дослідження якісних ефектів у галузі резонансу для обраної фізичної системи в акустичному полі з градієнтом інтенсивності. У разі акустичної потужності джерела випромінювання лише на рівні 10-15 дБ спостерігається слабке тяжіння опромінюваного об'єкта до джерела частот на 1-2 % нижче основний власної частоти об'єкта і слабке відштовхування для частот, лежачих вище на 1-2 % власної (резонансної) частоти.

При опроміненні фізичного об'єкта на резонансній частоті симетрично з двох сторін у ньому виникають сильні осциляції щодо положення рівноваги.

Вивчення поведінки фізичних об'єктів поблизу обертонів основного тону є предметом наших подальших досліджень.

Як показав виконаний теоретичний та експериментальний аналіз, пондеромоторна взаємодія може застосовуватися для дистанційного управління поведінкою динамічної системи в умовах, близьких до резонансних. Виконана робота може знайти застосування у різних пристроях та системах альтернативної енергетики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Schmidt, George.* Physics of High Temperature Plasmas, second edition. — Academic Press, 1979. — P. 47.

2. *Cary, J. R.; Kaufman, A. N.* Ponderomotive effects in collisionless plasma: A Lie transform approach // Phys. Fluids. — 1981. — Vol. 24. — P. 1238.

3. *Grebogi, C.; Littlejohn, R. G.* Relativistic ponderomotive Hamiltonian // Phys. Fluids. — 1984. — Vol. 27. — P. 1996.

4. *Morales, G. J.; Lee, Y. C.* Ponderomotive-Force Effects in a Nonuniform Plasma // Phys. Rev. Lett. — 1974. — Vol. 33. — P. 1016—1019.

5. *Lamb, B. M.; Morales, G. J.* Ponderomotive effects in nonneutral plasmas // Phys. Fluids. — 1983. — Vol. 26. — P. 3488.

6. *Shah, K.; Ramachandran, H.* Analytic, nonlinearly exact solutions for an rf confined plasma // Phys. Plasmas. — 2008. — Vol. 15. — P. 062303.

7. *Bucksbaum, P. H.; Freeman, R. R.; Bashkansky, M.; McIlrath, T. J.* Role of the ponderomotive potential in above-threshold ionization // Jour. Opt. Soc. B. — 1987. — Vol. 4. — P. 760.

8. І.Греков. Резонанс, 1952 р.

9. В. Г. Широносов. Резонанс у фізиці, хімії та біології – Іж., 2001. – 90 с.

10. Блехман І.І. Вібраційна механіка М.// Наука. 1994. - 400 с.

11. Експериментальне дослідження пондеромоторного впливу хвиль на резонатори / [Соч. Петра Лебедєва, прив.-доц. Імп. Моск. ун-ту. - М: типо-літ. т-ва І.М. Кушнерьов і К °, 1899. - 64 с.

12. Пондеромоторна дія та вид поля Круксової трубки, що випускає Х-промені / Н.П. Мишкін - С-П: тип. В. Демакова, 1899. – 12 с.